TERREMOTOS DE LA ANTIGÜEDAD • EL NACIMIENTO DE LA EPIGENETICA

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA NUEVA COSMOLOGIA

SINFONIA COSMICA

LOS PLANOS DE LA CREACION

CUANDO LA ACELERACION CAMBIO DE SIGNO

SALIR DE LA OSCURIDAD

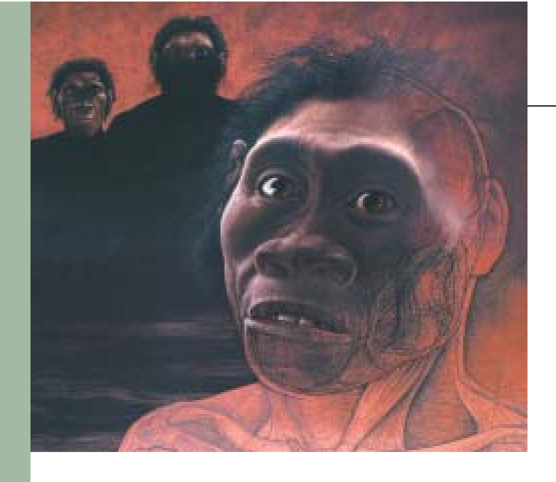


INVESTIGACION y CIENCIA

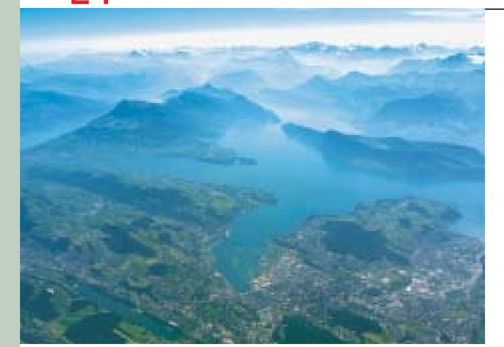
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Abril de 2004

Número 331















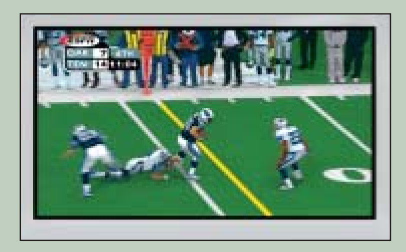
















DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

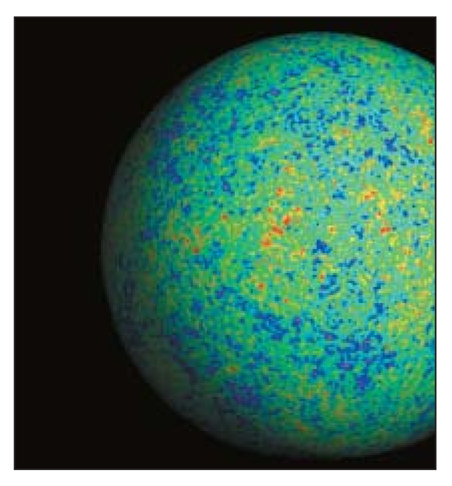
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *Migraciones prehistóricas de Africa a Eurasia*; Esteban Santiago: *El nacimiento de la epigenética*; Manuel Puigcerver: *Terremotos de la antigüedad*; M.ª Rosa Zapatero: *La sinfonía cósmica*; Luis Bou: *Los planos de la creación*, *Cuando la aceleración cambió de signo* y *Aventuras problemáticas*; Angel Garcimartín: *Salir de la oscuridad*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: NASA/WMAP SCIENCE TEAM

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

SEXO POR PLACER. «A dirigentes políticos, sociales y sanitarios de numerosos países les preocupan los problemas demográficos. Se están tomando medidas activas para difundir información sobre la planificación familiar en un esfuerzo por lograr un mejor compromiso entre recursos y población. Pero en su intento de introducir medidas de planificación familiar se enfrentan a un problema de envergadura: la necesidad de un método contraceptivo sencillo, práctico y al alcance económico de todo el mundo.»

TRITIO. «Hasta hace menos de una década, se desconocía la existencia del tritio. Descubierto primero como producto de síntesis en la transformación nuclear en los reactores, se detectó después en la naturaleza. Esto último no fue fácil. La cantidad total existente en nuestro planeta es inferior a un kilogramo, en su mayoría en los mares y tan disuelto que escapa a la detección. ¿Por qué preocuparse por dar con sustancia tan infinitesimal? La respuesta es que el tritio (hidrógeno radiactivo), como el radiocarbono, podría ser un excelente trazador para estudiar procesos naturales. Con él pueden datarse productos vegetales, y su presencia en las precipitaciones lluviosas podría dar mucha información acerca de los grandes movimientos del aire y la humedad sobre la faz de la tierra.—Willard F. Libby» [*Nota de la Redacción: Libby ganó el premio Nobel de química de 1960 por su trabajo sobre el carbono 14.*]

...cien años

EL PORTADOR DEL DENGUE. «Según el doctor Graham, de Beirut, al mosquito hay que achacar la transmisión de otra enfermedad, la fiebre del dengue, diversamente llamada fiebre africana, rompehuesos, fiebre de la jirafa, etc. Rara vez fatal, deja empero distintas secuelas desagradables: parálisis, insomnio, postración mental y física acusada, etc. Se presenta en climas cálidos y en los estados sureños de la Unión. En un experimento, el doctor Graham portó mosquitos infectados de dengue a una población de montaña situada a 900 metros de altitud, donde no había mosquitos ni dengue. Uno de los nativos fue encerrado en una habitación con los mosquitos y, al cuarto día, cayó enfermo con un ataque agudo de dengue. Los mosquitos fueron destruidos de inmediato y ya no hubo más casos.»

TRAJE ANTIHUMO. «El tipo de incendio que más atemoriza a los bomberos es el acompañado de humos sofocantes y gases nocivos. Para que puedan enfrentarse con éxito a incendios de ese tipo, un inventor de Colorado ha ideado una vestimenta similar a la de los buzos, cuya ilustración se adjunta. Consiste en una prenda, de material estanco a los gases, que cuelga desde el caso y se ciñe a la cintura. El aire del interior se mantiene puro gracias a los productos químicos contenidos en una caja que el bombero lleva a la espalda.»


Traje de seguridad para bomberos, 1904.

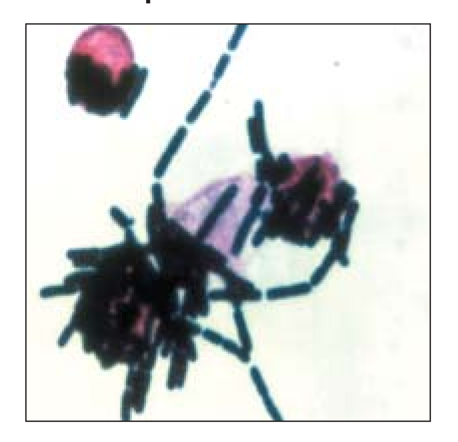
...ciento cincuenta años

PRUEBA PERICIAL. «Uno de los casos de envenenamiento más importantes juzgados en Estados Unidos es el de John Hendrickson, hijo, en junio y julio de 1853, por el asesinato de su esposa Maria. Se le acusó de envenenarla con aconitina (matalobos) y se le declaró culpable ante las pruebas científicas. Habiéndose publicado el testimonio completo de la vista, una copia cayó en manos del profesor Wells, de Boston, quien fuertemente impresionado por la absoluta falta de solidez del testimonio científico por el que se condenó al preso, ha presentado una petición, firmada por un grupo de los farmacéuticos más destacados de nuestro país, tratando de evitar la ejecución.» [*Nota de la redacción: Hendrickson fue ahorcado el cinco de mayo de 1854.*]

UN LUGAR HERMOSO. «El doctor Hooker, en sus ‘Diarios del Himalaya’, recién publicado, ofrece la siguiente descripción de una agradable excursión por el Himalaya nepalí: ‘Las sanguijuelas pululaban —su número era increíble— en las corrientes de agua, en las húmedas hierbas y en los matorrales; se me introducían en el cabello, se colgaban de los párpados, me trepaban por las piernas, se deslizaban espalda abajo. Una y otra vez me quitaba más de cien de las piernas, donde se arracimaban en el empeine; las llagas que me produjeron no sanaron antes de cinco meses, y aún hoy me quedan las cicatrices.’»

APUNTES

MICROBIOLOGIA
Sin hospedador



Las bacterias del carbunco pueden desarrollarse fuera del hospedador.

Nadie creía que el germen causante del carbunco, *Bacillus anthracis*, pudiera desarrollarse fuera de un hospedador vivo, pero nuevos datos sugieren que medra perfectamente en el barro común. Philip C. Hanna, microbiólogo de la facultad de medicina de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores han experimentado con cieno. Eliminaron, mediante filtración, los microorganismos preexistentes y sembraron el cieno con esporas latentes de una cepa de carbunco no infecciosa. El equipo detectó todos los estadios del ciclo biológico del germen. Podría explicar por qué los rebaños de ganado y la caza mayor sufren brotes de carbunco cuando a una estación lluviosa sigue una época cálida y seca: los gérmenes florecen tras los chaparrones y se concentran en los abrevaderos resecos. No queda claro el grado de actividad de los gérmenes en condiciones naturales, donde se encuentran con competidores que podrían limitar su propagación. En todo caso, el descubrimiento induce a pensar en la posibilidad de que el carbunco intercambie genes con otros microorganismos de los suelos, incluidos algunos que favorezcan la resistencia a los antibióticos.

—Charles Choi

BIOTECNOLOGIA
Desminar con plantas

Las minas terrestres matan o hieren a unas 26.000 personas al año. Alrededor de 100 millones de esas armas siguen intactas, repartidas por unos 75 países. Para detectar esas bombas ocultas podrían emplearse plantas modificadas genéticamente. Aresa Biodetection, de Copenhague, ha modificado *Arabidopsis thaliana* con ese fin. Cuando las raíces detectan sustancias habituales en la composición de los explosivos, por ejemplo el dióxido de nitrógeno, que se desprende al corroerse las minas, la planta reacciona como si fuera otoño y pierden el color verde en un plazo de tres a cinco semanas. Aresa planea someter a ensayo sus plantas, cuyo polen ha sido esterilizado, en zonas restringidas de Sri Lanka, Bosnia y otros lugares azotados por la guerra. Se espera limpiar, sin peligros y a bajo coste, terrenos infestados de minas a fin de que los agricultores puedan volver a cultivarlos. La empresa está también trabajando en plantas citadas para detectar y eliminar metales pesados en suelos contaminados.

—Charles Choi



Planta otoñal, mala señal: Los explosivos enterrados colorean de rojo las plantas (en cada maceta, los cuadrados a la derecha de la etiqueta "1").

COSMOLOGIA
Miscelánea galáctica

En 2002 se descubrían varios cuásares con corrimientos al rojo z mayores de 6. Era la primera vez que se sondeaba el universo en una época en que el gas cósmico no estaba aún ionizado por completo. Pero en las últimas semanas esta *terra incognita* se ha revelado en toda su exuberancia, y a profundidades mucho mayores aún. A los pocos días del anuncio de la detección de una galaxia a $z = 10$ —que además dejaba ver que, al menos localmente, la reionización estaba bastante avanzada en ese momento— el Campo Ultraprofundo del telescopio espacial Hubble mostraba toda una población de objetos de z elevadísimo, algunos quizá con $z = 12$, a sólo 400 millones de años de la gran explosión. Casi al mismo tiempo, un grupo encabezado por Adam Riess exponía el hallazgo, que él mismo adelanta en uno de los artículos de este número, de seis de las siete supernovas más lejanas que se conocen. Yun Wang y Max Tegmark han extraído del trabajo de este grupo nuevas restricciones para los modelos de universo dotados de energía oscura. De todas las variantes posibles, un 95 % duraría aún al menos 49.000 millones de años, un 25 % acabaría contrayéndose catastróficamente hasta un estado de máxima densidad, un 8 % se expandiría desbocadamente y un 67 % se expandiría, para siempre, a un ritmo acotado. Los resultados parecen favorecer los modelos más elementales: aquellos en que la energía oscura corresponde a la constante cos-

PHILIP C. HANNA, *Escuela Médica de la Universidad de Michigan* (*arriba*); CORTESIA DE ARESA BIODETECTION (*abajo*)

mológica de Einstein (es decir, su densidad no variaría a lo largo de la evolución del universo). Por otra parte, ya se han comunicado los primeros análisis del Campo Profundo del Hubble: ratifican que el ritmo de formación de estrellas a *z* del orden de 6 es un sexto del que hay en *z* del orden de 3. Esto pone en un brete a los modelos donde la reionización del universo se debe a galaxias formadoras de estrellas entre $z = 6$ y $z = 10$. El modelo cosmológico dominado por la energía oscura, plano, con expansión acelerada, ha terminado por convertirse en canónico con las últimas cartografías cósmicas, pero, a la vez, ciertos detalles relativos a la evolución de las galaxias están dejando de encajar. Así, el análisis de un brote de formación de estrellas a $z = 2,5$ mediante el espectrómetro de infrarrojos SPIFFI abona la conclusión de otras observaciones, como las del Sondeo Profundísimo Géminis, también conocidas en 2004: las masas de las galaxias son mayores de lo esperado a *z* del orden de dos. Supone una dificultad para el modelo de formación de las galaxias vigente, el jerárquico, según el cual van creciendo por fusión de galaxias menores.

FISICA

Rodamiento sin fricción

Hans J. Herrmann, físico de la Universidad de Stuttgart, tras asistir en 1985 a una conferencia en que se hablaba de cuán bajo era el rozamiento en el deslizamiento de las placas tectónicas, se puso a reflexionar sobre la naturaleza de los grupos de rodamientos de bolas que llenaban un espacio. No tardó en descubrir ordenaciones teóricas de discos bidimensionales que giran en buena armonía, pero la versión tridimensional se mostró escurridiza: en cualquiera de las ordenaciones, siempre había bolas que, en vez de rodar, patinaban y rozaban unas sobre otras. Herrmann y sus colaboradores ya han resuelto el problema teórico. Imagínese una esfera con seis esferas menores en su interior, situadas como los vértices de un octaedro regular. El espacio libre dentro de la esfera grande puede rellenarse con esferas aún menores, siguiendo un patrón fractal mediante una técnica matemática llamada inversión. Gírese una esfera, y las demás girarán sin rozamiento. Un rodamiento real basado en este modelo contendría un número muy grande, pero finito, de esferas, que seguirían, según Herrmann, libres de rozamiento salvo que se las obligase a desplazarse de sus posiciones.

Sin parar: Modelo teórico del rodamiento de bolas, con éstas dispuestas de modo que no resbalen unas en las otras.

—J. R. Minkel

ALMACENAMIENTO DE HIDROGENO

Cristales de combustible

El almacenamiento de hidrógeno elemental para que sirva de combustible no contaminante requiere, desde un punto de vista práctico, temperaturas demasiado bajas, o presiones demasiado altas. Wendy y David Mao, padre e hija, han comprimido cristales de hidrógeno y agua o metano por medio de una “prensa de diamante” y los han enfriado con nitrógeno líquido. En un caso, obtuvieron así un clatrato, un cristal de agua que, cuando retornaba a la presión atmosférica, encerraba hidrógeno en sus espacios intersticiales (un 5,3 por ciento en peso). La proporción de hidrógeno almacenada es apreciable; las actuales baterías de hidruro metálico contienen sólo un 2 o 3 por ciento. No cuesta extraerla calentando el clatrato. Diferentes aditivos y formas de calentar y presurizar podrían hacer que este método resultase más práctico. *—J. R. Minkel*

PSICOLOGIA

Prejuicios y emociones

La cólera podría activar prejuicios espontáneos. Un equipo de psicólogos pidió a 87 voluntarios que escribieran los pormenores de acontecimientos de su pasado que les hicieran sentir cólera, tristeza o una emoción neutra. Los participantes fueron luego asignados a dos grupos, el rojo y el azul. Ante los sujetos se hizo destellar palabras procedentes de sus escritos, ligadas a la cólera, la tristeza o la neutralidad, seguidas de imágenes de personas pertenecientes a ambos grupos. Luego se les pidió que categorizaran, a bote pronto, a esos otros participantes positiva o negativamente. Cuando el sentimiento era de cólera, los sujetos azules valoraban negativamente a los individuos rojos, pero no a los azules. La tristeza y la neutralidad no producían ningún efecto. *—Charles Choi*



Cuanto más furioso, más parcial.

HANS J. HERRMANN Y REZA MAHMOODI (*arriba*); LEFT LANE PRODUCTIONS/*Corbis* (*abajo*)

Migraciones prehistóricas de Africa a Eurasia

Los descubrimientos paleontológicos recientes en la república de Georgia refutan muchas de las hipótesis avanzadas para explicar la primera migración del *Homo erectus*

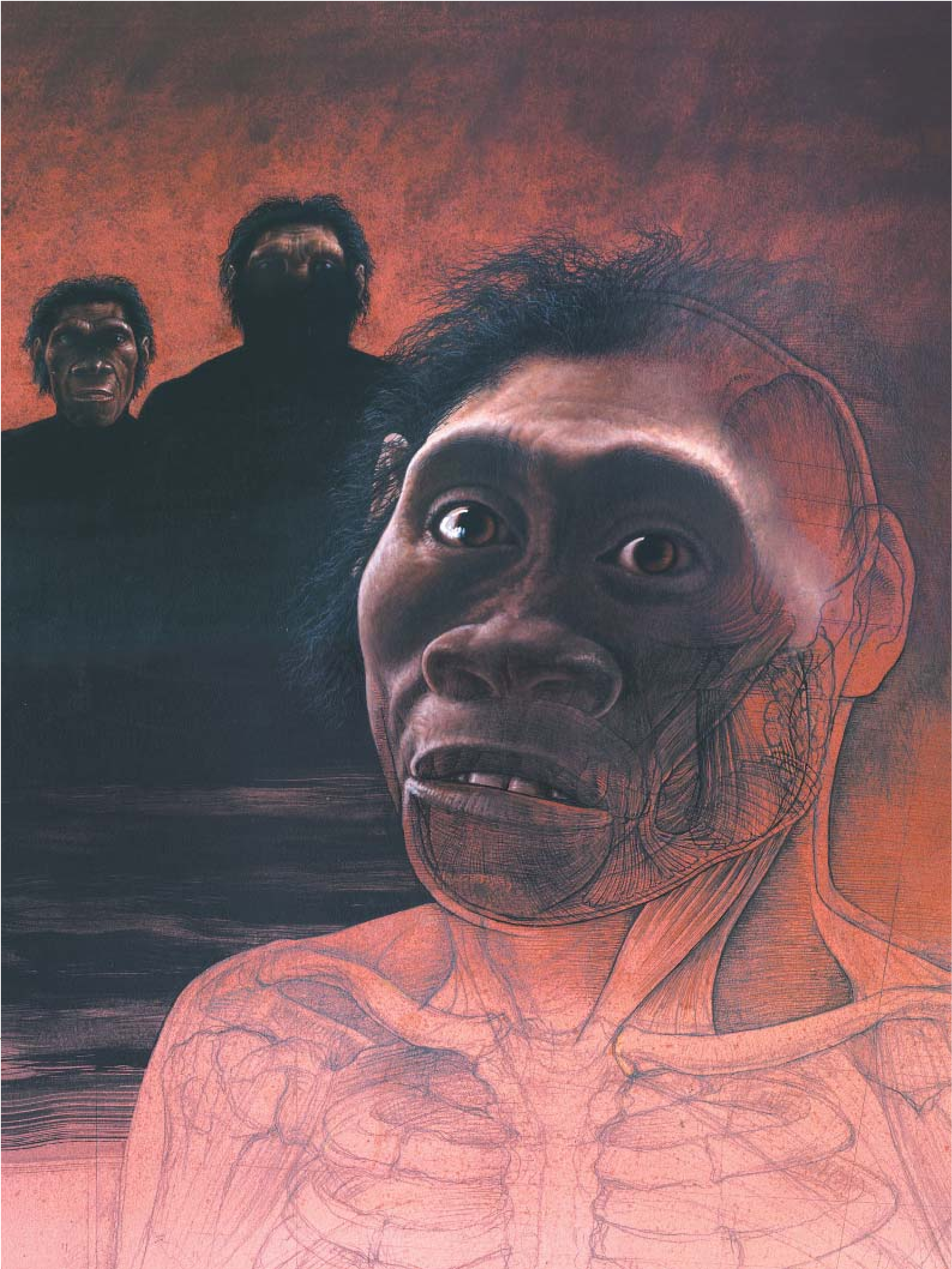
Kate Wong

Inventores de naves espaciales y buques submarinos, los humanos son exploradores intrépidos por naturaleza. Desde una perspectiva evolutiva, nos caracterizamos por una tendencia a la colonización. Ningún otro primate supera el alcance de nuestra expansión. Pero no siempre nos hemos mostrado tan cosmopolitas. Durante los siete millones de años de evolución homínida persistieron confinados en los límites de su continente originario, Africa. En algún momento del pasado, sin embargo, emigraron de ese continente, iniciando un nuevo capítulo en la historia de nuestro linaje.

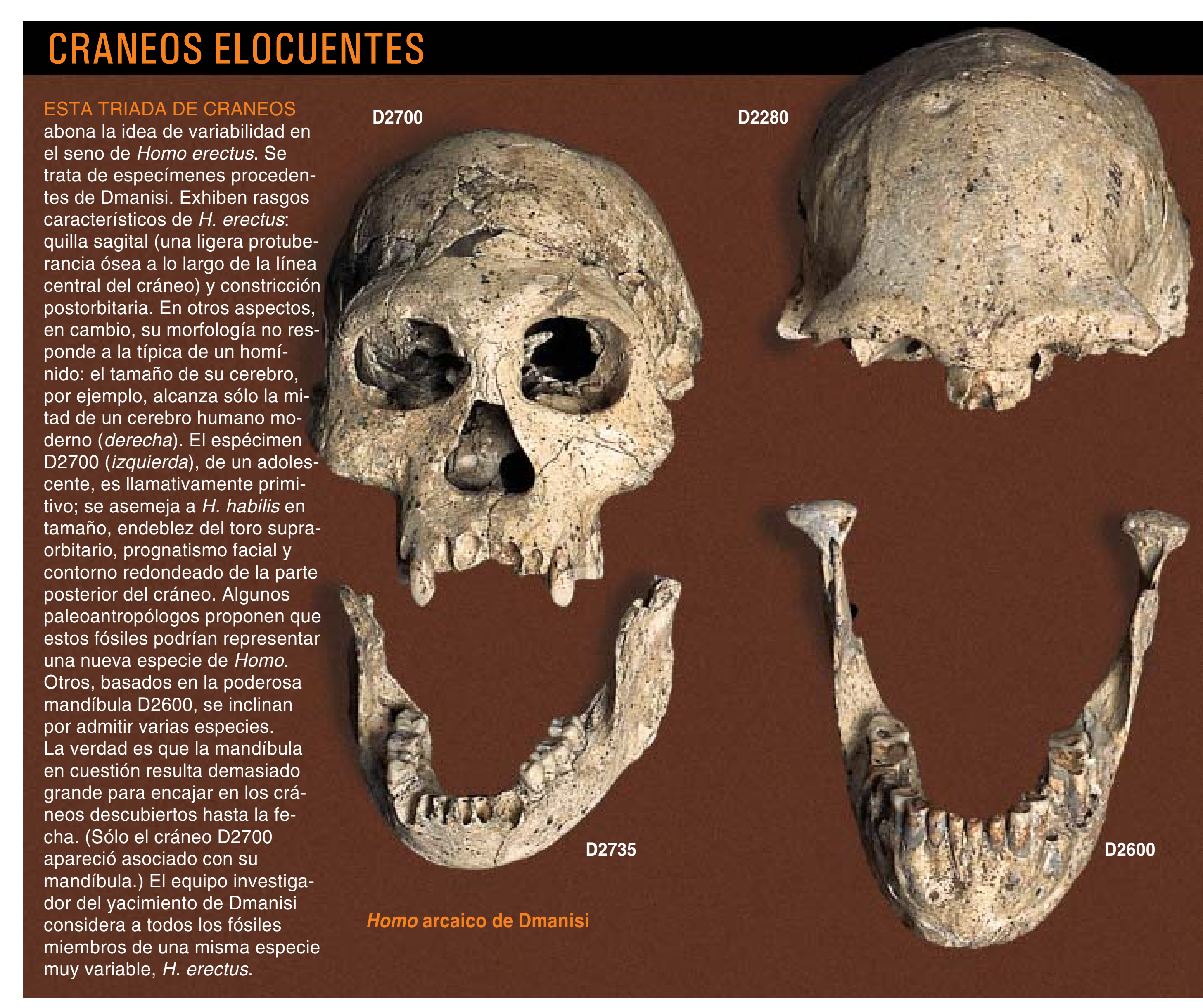
Hasta hace poco, el registro fósil de ese período permanecía oculto a nuestros ojos. Las pruebas disponibles se reducían a un magro conjunto de fósiles humanos hallados en China y en Java. De tales restos los paleoantropólogos infirieron que el primer viaje intercontinental lo realizó un miembro de la especie *Homo erectus*, miembro primitivo de nuestro propio género. Ocurriría ello hace poco más de un millón de años. Unas extremidades largas y un cerebro voluminoso le proporcionaban la zancada y la inteligencia propias de un explorador. Los homínidos que le habían precedido, entre ellos *H. habilis* y los australopitecinos, habían desarrollado un cuerpo y un cerebro similares a los actuales chimpancés. Las proporciones corporales de *H. erectus*, en cambio, presagiaban las que definirían al hombre moderno.

RETRATO DE EXPLORADOR: Con la mitad de la capacidad cerebral de un humano moderno y toros supraorbitarios similares al de *Homo habilis*, este homínido constituye uno de los miembros más primitivos de nuestro género presentes en el registro fósil. El artista John Gurche ha reconstruido este explorador adolescente de 1,75 millones de años de antigüedad utilizando el cráneo bastante entero de *Homo erectus* y su mandíbula, descubiertos en el yacimiento de Dmanisi, en la República de Georgia. Las dos figuras del fondo se han recreado a partir de sendos cráneos parciales que se han hallado en el mismo yacimiento.

JOHN GURCHE



CRANEOS ELOCUENTES



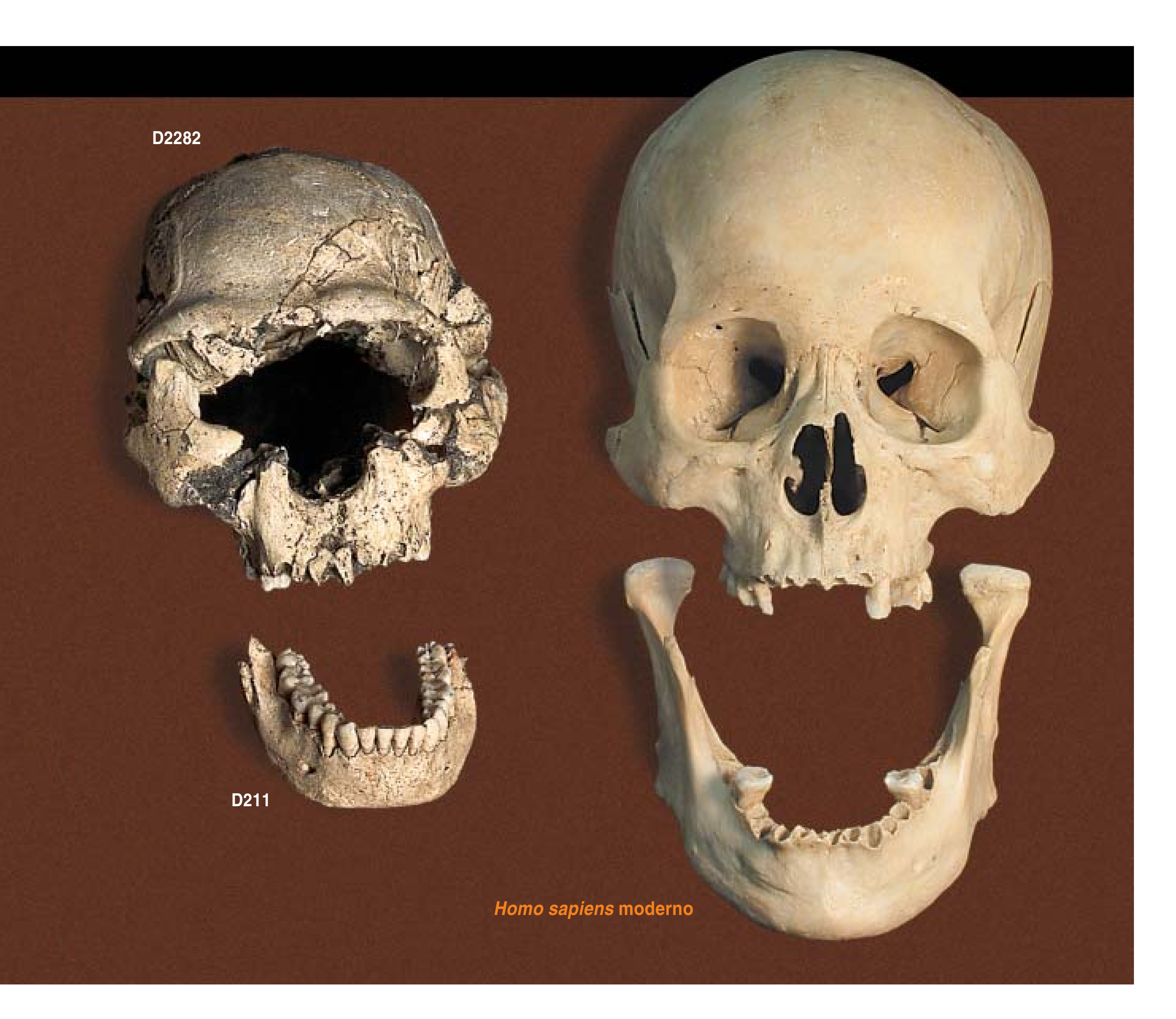
ESTA TRIADA DE CRANEOS abona la idea de variabilidad en el seno de *Homo erectus*. Se trata de especímenes procedentes de Dmanisi. Exhiben rasgos característicos de *H. erectus*: quilla sagital (una ligera protuberancia ósea a lo largo de la línea central del cráneo) y constricción postorbitaria. En otros aspectos, en cambio, su morfología no responde a la típica de un homínido: el tamaño de su cerebro, por ejemplo, alcanza sólo la mitad de un cerebro humano moderno (*derecha*). El espécimen D2700 (*izquierda*), de un adolescente, es llamativamente primitivo; se asemeja a *H. habilis* en tamaño, endeblez del toro supraorbitario, prognatismo facial y contorno redondeado de la parte posterior del cráneo. Algunos paleoantropólogos proponen que estos fósiles podrían representar una nueva especie de *Homo*. Otros, basados en la poderosa mandíbula D2600, se inclinan por admitir varias especies. La verdad es que la mandíbula en cuestión resulta demasiado grande para encajar en los cráneos descubiertos hasta la fecha. (Sólo el cráneo D2700 apareció asociado con su mandíbula.) El equipo investigador del yacimiento de Dmanisi considera a todos los fósiles miembros de una misma especie muy variable, *H. erectus*.

GOURAM TSIBAKHASHVILI (*fósiles*); CHRISTIAN SIDOR *Escuela Universitaria de Medicina Osteopática de Nueva York* (*cráneo moderno*)

Pero los primeros representantes africanos de *H. erectus*, un grupo que en ocasiones recibe el nombre de *H. ergaster*, habían aparecido hace sólo 1,9 millones de años. ¿Qué demoró su largo peregrinaje? Para explicarlo, se propuso que *H. erectus* no pudo haber avanzado hacia latitudes septentrionales hasta que adquirió el dominio de la fabricación de útiles líticos, una cultura técnica que recibe la denominación de cultura achelense. Esta industria permitía obtener instrumentos muy estandarizados como los bifaces y otros utensilios simétricos. No conocemos con exactitud las ventajas que aportaban estas herramientas sobre las lascas, las monofaces y las raederas del Olduwayense; a buen seguro, facilitaban la descuartización de la caza. En

Resumen/*Los primeros colonizadores*

- La investigación paleoantropológica venía sosteniendo que los primeros homínidos en abandonar Africa eran altos, estaban dotados de cerebros voluminosos y dominaban técnicas líticas avanzadas. Comenzarían su migración hacia el norte hace alrededor de un millón de años.
- Pero los hallazgos recientes de la República de Georgia nos obligan a cuestionar tal hipótesis. Los fósiles allí desenterrados superan, en medio millón de años, la antigüedad de otros restos homínidos que se reputaban los más antiguos fuera de Africa. Eran individuos de talla bastante menor y su industria bastante más rudimentaria.
- ¿Cuál fue, pues, la razón que impulsó a nuestros precursores a abandonar su continente natal? En el muestrario fósil de Dmanisi encontramos una oportunidad excepcional para estudiar no un representante solitario de los primeros *Homo*, sino una población.



cualquier caso, los vestigios más antiguos de presencia humana fuera de Africa correspondieron durante muchos años a los instrumentos de tipo achelense hallados en el yacimiento israelí de ‘Ubeidiya.

Provisto de una musculatura fuerte, un cerebro voluminoso y una técnica lítica avanzada, este homínido representaba la imagen arquetípica del explorador. Quizá demasiado. En los últimos años, se ha descubierto en el yacimiento de Dmanisi, enclavado en la República de Georgia, un formidable conjunto de restos fósiles, en perfecto estado de conservación, útiles tallados y fragmentos de animales de hace 1,75 millones de años, aproximadamente medio millón de años más antiguos que los restos de ‘Ubeidiya. Ningún otro yacimiento de la época de los primeros *Homo* ha proporcionado tal muestrario de huesos. Constituye un auténtico tesoro para la paleoantropología y ofrece una oportunidad sin precedentes para escudriñar en la vida y en la época de nuestros precursores homínidos. Estos hallazgos han mostrado algo sorprendente: la anatomía y la técnica de los homínidos de Georgia resultan mucho más primitivas de lo esperado. Ante ese singular muestrario, cabe preguntarse no sólo por las causas que impulsaron a aquellos primeros humanos a dejar Africa, sino también por el modo en que la abandonaron.

Un comienzo dudoso

El tranquilo pueblo de Dmanisi, situado en las estribaciones de la cordillera del Cáucaso, dista 85 kilómetros, en dirección sudoeste, de Tbilisi, la capital de Georgia, y 20 kilómetros de la frontera con Armenia, por el norte. Durante la Edad Media, Dmanisi constituía una de las principales ciudades de su tiempo y núcleo de parada en la Ruta de la Seda. De ahí su interés arqueológico. En los años treinta del siglo pasado comenzaron las primeras excavaciones de su ciudadela medieval. En 1983, Abesalom Vekua, paleontólogo de la Academia de Ciencias de Georgia, descubrió en silos de grano restos fósiles de un rinoceronte extinguido

desde hacía mucho tiempo. Fue entonces cuando se empezó a sospechar que el yacimiento podía encerrar información de gran trascendencia. Al cavar esos pozos, los habitantes de la ciudadela habían abierto una ventana a su pasado prehistórico.

El año siguiente, el hallazgo de utensilios líticos primitivos avivó la esperanza de encontrar restos humanos fósiles. Por fin, el último día de la campaña de excavación de 1991, apareció un hueso homínido bajo el esqueleto de un tigre de diente de sable.

A partir de la datación estimada de los restos de fauna que lo acompañaban, se dedujo que este fósil humano, una mandíbula que se atribuyó a *Homo erectus*, tenía alrededor de 1,6 millones de años, lo que le convertía en el homínido más antiguo hallado fuera de Africa. Un año más tarde, cuando David Lordkipanidze y Leo Gabunia, de la Academia de Ciencias de Georgia, presentaron el espécimen durante una reunión internacional de paleoantropólogos en Alemania, sus hipótesis fueron recibidas con escepticismo. Se suponía que los humanos no habían abandonado Africa hasta hace un millón de años. La mandíbula, que conservaba todos los dientes en su posición, parecía demasiado perfecta para otorgarle la edad sugerida por los georgianos. La mandíbula de Dmanisi sólo creaba interrogantes.

A pesar de todo, el equipo continuó con la excavación del yacimiento, para avanzar en el conocimiento de su geología y en busca de nuevos fósiles humanos. Su perseverancia se vio recompensada en 1999, cuando hallaron dos cráneos a escasos metros de donde había aparecido la mandíbula ocho años antes. Meses después, publicaron en *Science* un artículo sobre los nuevos fósiles. Los hallazgos establecían una estrecha relación entre los homínidos de Dmanisi y *H. erectus* africano. Compartían, entre otros rasgos, una misma forma del torus supraorbitario. Esta similitud contrastaba con las diferencias existentes entre los fósiles humanos más antiguos hallados en Asia oriental y en Europa occidental, que presentaban rasgos distintivos de cada región.

Por aquel entonces, se había determinado con mayor precisión la edad de los fósiles, que proceden de unos sedimentos depositados sobre un potente estrato de roca volcánica fechada, por métodos radiométricos, en 1,85 millones de años. Para C. Reid, de la Universidad del Norte de Texas, la superficie sin erosionar del basalto indica que transcurrió poco tiempo desde que se formó la capa sedimentaria donde se incluyen los fósiles. A tenor de los análisis paleomagnéticos, los sedimentos se depositaron hace cerca de 1,77 millones de años, coincidiendo con el límite Matuyama-Olduvai, momento en que la polaridad magnética de la Tierra se invirtió. Se corrobora ese guarismo con la datación de los restos fósiles de animales que acompañan a los homínidos (por ejemplo, un roedor *Mimomys*, que vivió entre hace 1,6 y 2,0 millones de años) y con un segundo nivel de basalto, de 1,76 millones de años, de un yacimiento cercano, que cubría el mismo horizonte estratigráfico.

INDUSTRIA LITICA PRIMITIVA

HASTA AYER MISMO creíase que los homínidos no abandonaron Africa hasta haber desarrollado una cultura técnica avanzada, la Achelense, que se caracteriza por la conformación simétrica y normalizada de instrumentos (*bifaz de la derecha*). Sin embargo, en Dmanisi han aparecido útiles rudimentarios: lascas y cantos unifaciales (*izquierda y centro*), que definen a la técnica Olduwayense, mucho más primitiva y utilizada por los homínidos de Africa un millón de años antes.

Cantos unifaciales de Dmanisi

Bifaz achelense

GOURAM TSIBAKHASHVILI

EL YACIMIENTO DE DMANISI

EL PUEBLO DE DMANISI se encuentra a 85 kilómetros de la capital de la República de Georgia, Tbilisi. Siglos atrás, el enclave constituía un nudo central de las vías comerciales de bizantinos y persas. Se reconocen los vestigios de un pasado intenso: tumbas paleomusulmanas, sepulcros medievales y, sobre todo, las imponentes ruinas de una ciudadela se alzan en un promontorio desde el que se controlaba la Ruta de la Seda.

Mucho antes del apogeo y ocaso de la ciudad, fue éste el dominio de un homínido primitivo, el primero en salir de Africa e iniciar la colonización del resto del Viejo Mundo hace 1,75 millones de años, mucho antes de lo que tradicionalmente se suponía. Hace doce años, David Lordkipanidze, director hoy del Museo estatal de Georgia, participó del descubrimiento del primer hueso homínido en Dmanisi. Desde entonces se han recuperado cuatro cráneos, 2000 útiles líticos y miles de fósiles animales. Para muchos paleoantropólogos se trata del yacimiento más espectacular de los excavados en los últimos años.

Un área cuadrada de 20 × 20 metros constituye la zona principal de excavación. En este lugar, en el año 2001 se encontró un cráneo extraordinariamente completo y su mandíbula asociada. En el inicio de la campaña, cada investigador se ocupa de una parcela de un metro cuadrado, en la que se registra meticulosamente la posición tridimensional de cada fragmento de hueso o artefacto que aparece durante la remoción del sedimento. Una vez etiquetados, se guardan para su posterior estudio. Tras cerner y lavar la cosecha, aparecen conchas de moluscos y minúsculos huesos de micromamíferos que proporcionan información acerca del ecosistema.



GOURAM TSIBAKHASHVILI

1. Las excavaciones arqueológicas de la ciudadela medieval de Dmanisi condujeron al descubrimiento de fósiles mucho más antiguos. Hasta ahora, los paleoantropólogos han excavado minuciosamente en un área de unos 100 metros cuadrados, pero se cree que el yacimiento puede abarcar unos 11.000 metros cuadrados.

En el laboratorio de campo, se clasifican los restos. Observados al microscopio nos revelan la especie a la que pertenece cada hueso; los cortes y mellas superficiales nos dirán si sufrieron alguna acción depredadora. En ciertos casos, estos datos pueden ayudar a comprender el origen de la acumulación de los huesos. Unos, por ejemplo, indican que los huesos habrían sido acumulados por tigres de diente de sable en sus cubiles. Otros denotan actividad humana, ya que la abundancia de huesos aplastados y fracturados es propia de la presencia de homínidos, no de felinos carnívoros.



MARC MEYER *Universidad de Pennsylvania*

2. LOS MIEMBROS DEL EQUIPO excavan y cepillan los sedimentos calcáreos para descubrir los útiles líticos y los restos de animales consumidos por homínidos.

El hallazgo de los nuevos fósiles y el refinamiento de las dataciones zanjaron la cuestión. Dmanisi se convirtió en el yacimiento de fósiles homínidos más antiguo fuera de Africa; la colonización de Eurasia se retrotrajo cientos de miles de años. Asimismo, quedó refutada la hipótesis que postulaba la exigencia previa del dominio de la cultura achelense para salir de Africa. La industria lítica de Dmanisi sólo incluía útiles rudimentarios, de tipo olduwayense, elaborados con materias primas del lugar.

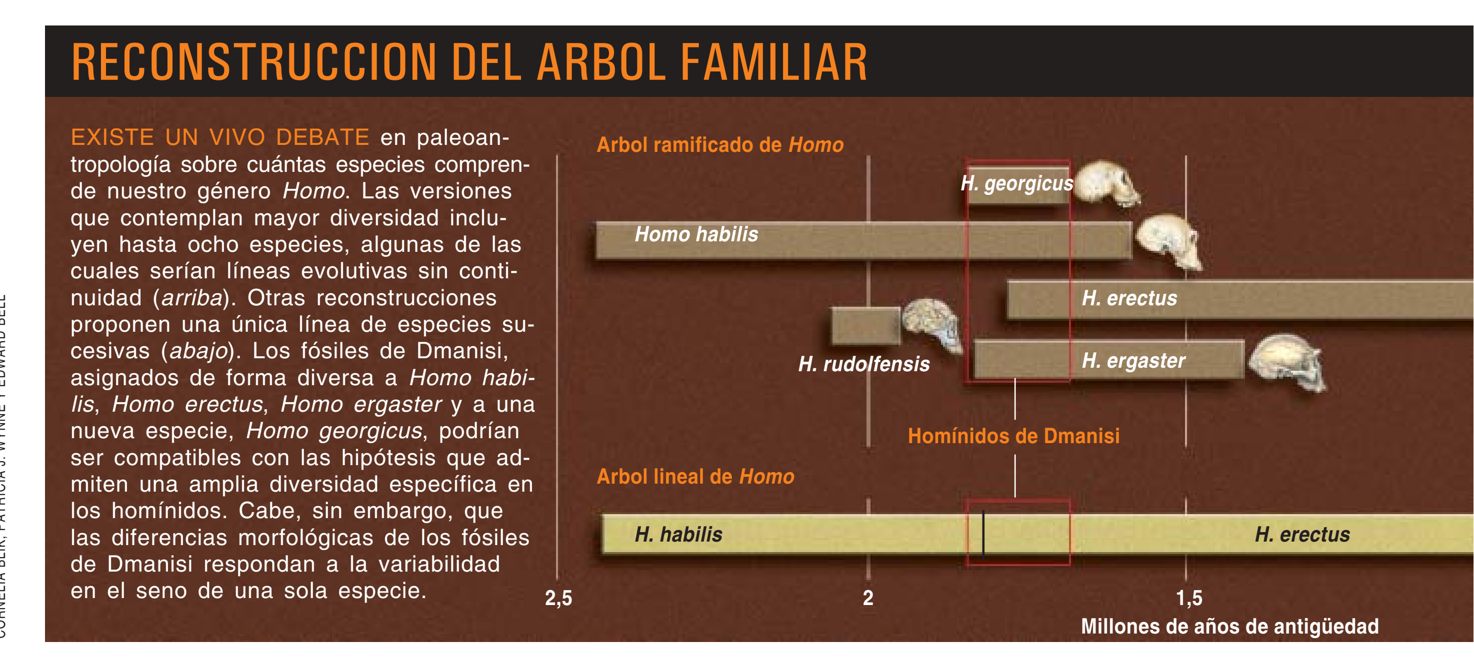
La talla del explorador

Además de la antigüedad de los fósiles y el carácter rudimentario de su industria, Dmanisi escondía otras sorpresas. En julio de 2003, el equipo de Lordkipanidze publicó el hallazgo de un tercer cráneo. Bastante completo, conserva incluso su mandíbula y constituye uno de los especímenes más primitivos de *Homo* descubiertos hasta la fecha. Los dos primeros cráneos que se hallaron habían encerrado 770 y 650 centímetros cúbicos de materia gris, respectivamente, mientras que el tercer cráneo tenía una capacidad cerebral de sólo 600 centímetros cúbicos, menos de la mitad del tamaño de un cerebro humano moderno y considerablemente menor que lo esperado en *H. erectus*. Tampoco la morfología de este tercer cráneo respondía enteramente a un *H. erectus*. La ligereza del toro supraorbitario, el prognatismo facial y la curvatura de la parte posterior del cráneo lo aproximaban a *H. habilis*, precursor putativo de *H. erectus*.

Creíase que los homínidos que protagonizaron la primera migración de Africa tenían un cerebro notable. Ahora comprobamos, por el contrario, que la caja craneana de estos primeros viajeros apenas superaba la de *H. habilis*, más del primitivo. Tampoco parecía que los homínidos de Georgia hubieran desarrollado mayor talla que *H. habilis*. Aunque sólo se han encontrado elementos sueltos del esqueleto poscraneal (costillas, clavículas, vértebras y huesos de ambas extremidades), pendientes de una descripción adecuada, G. Philip Rightmire, de la Universidad de Binghamton y miembro del equipo paleontológico, sostiene que hay información suficiente para asegurar que los pobladores eran de talla pequeña.

Provisionalmente adscritos al taxón *H. erectus*, los homínidos de Dmanisi podrían corresponder a las primeras fases evolutivas de dicha especie; es decir, podrían constituir una suerte de eslabón perdido entre *H. erectus* y *H. habilis*. Defiende esa opinión Lordkipanidze. Otros paleoantropólogos han propuesto un esquema taxonómico más complejo. Jeffrey Schwartz, de la Universidad de Pittsburgh, pone el énfasis en la variabilidad anatómica que muestran los cráneos y las mandíbulas recuperadas, entre ellas una mandíbula poderosa, descubierta el año 2000; sugiere que los fósiles de Dmanisi podrían corresponder a dos o más especies de homínidos. En cambio, Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, cree que, sencillamente, esa mandíbula robusta pertenecería a un macho y el resto de la osamenta a hembras.

Dado que todos los fósiles proceden del mismo nivel estratigráfico, Lordkipanidze insiste en que lo más probable es que pertenezcan a una misma población de *H. erectus*. Dmanisi, apostilla, ofrece una magnífica oportunidad para reflexionar sobre el concepto de variabilidad. Hasta ahora, se aceptaba que *H. erectus* variaba poco morfológicamente (y así lo respaldan los recientes descubrimientos del yacimiento de Bouri, en la región etíope del Middle Awash, del yacimiento keniata de Illeret). Pero Lordkipanidze sospecha que, conforme se vaya profundizando en el conocimiento de los fósiles georgianos, habrá que ir revisando el sexo y la especie de más de un fósil africano. Será un buen momento para volver a plantearse la identidad de los fundadores de nuestro propio linaje. La verdad es que bastantes expertos se preguntan si *H. habilis* no fue en realidad una especie del género *Australopithecus*.



RECONSTRUCCION DEL ARBOL FAMILIAR

EXISTE UN VIVO DEBATE en paleoantropología sobre cuántas especies comprende nuestro género *Homo*. Las versiones que contemplan mayor diversidad incluyen hasta ocho especies, algunas de las cuales serían líneas evolutivas sin continuidad (*arriba*). Otras reconstrucciones proponen una única línea de especies sucesivas (*abajo*). Los fósiles de Dmanisi, asignados de forma diversa a *Homo habilis*, *Homo erectus*, *Homo ergaster* y a una nueva especie, *Homo georgicus*, podrían ser compatibles con las hipótesis que admiten una amplia diversidad específica en los homínidos. Cabe, sin embargo, que las diferencias morfológicas de los fósiles de Dmanisi respondan a la variabilidad en el seno de una sola especie.

CORNELIA BLIK, PATRICIA J. WYNNE Y EDWARD BELL

EL EXODO AFRICANO

Ceprano, Italia 0,8 M.a.
Dmanisi, Georgia 1,75 M.a.
Atapuerca, España 0,78 M.a.
Donggutuo, China 1,0 M.a.
Orce, España 1,0 M.a.?
'Ubeidiya, Israel 1,0–1,5 M.a.
Riwat, Pakistán 2,0 M.a.?
Gongwangling, China 1,1 M.a.
Bahr el Ghazal, Chad 3,0-3,5 M.a.
Hadar, Etiopía 3,0–3,4 M.a.
Turkana, Kenia 1,6–1,9 M.a.
Garganta de Olduvai, Tanzania 1,2–1,8 M.a.
Laetoli, Tanzania 3,6 M.a.
Java, Indonesia 1,8 M.a.?
Swartkrans, Sudáfrica 1,5–2,0 M.a.
Sterkfontein, Sudáfrica 2,5 M.a.

Australopitecinos
Homo habilis
Homo erectus
Homo posteriores
Yacimientos con industria lítica; especie humana desconocida
M.a. = Millones de años de antigüedad

MIGRACIONES DE HOMINIDOS. Los fósiles de Dmanisi indican que los homínidos salieron de Africa hace al menos 1,75 millones de años. La colonización del Asia oriental se produjo hace 1,1 millones de años. Sin embargo, parece que los homínidos no poblaron Europa occidental hasta mucho después. Quizá sus competidores carnívoros o un clima inhóspito impidieron asentamientos anteriores en el continente europeo.

Del análisis cladístico de *H. habilis,* apunta Bernard Wood, de la Universidad George Washington, no se infiere que haya que situar a *habilis* dentro de *Homo*. A tenor de las proporciones de cráneo y cuerpo, de los rasgos mandibulares y dentarios y de ciertas características relacionadas con la locomoción, *habilis* se asemeja a los australopitecinos. Si tal vinculación fuera correcta, la aparición de *H. erectus* señalaría el nacimiento de nuestro género. Pero lo que todavía no está claro, según Wood, es la situación de los homínidos de Dmanisi en esta división: ¿pertenecen a *Homo* o a *Australopithecus*?

H. sapiens
H. heidelbergensis
H. neanderthalensis
H. sapiens
1
0,5
Actualidad

Dejando a un lado la cuestión taxonómica, la baja estatura de los individuos de Dmanisi nos plantearía una dificultad añadida. Otra de las hipótesis más extendidas sobre las razones que impulsaron a los homínidos a salir de Africa la avanzaron en los años ochenta Alan Walker y Pat Shipman, de la Universidad estatal de Pennsylvania. Reelaborada más recientemente por el grupo de William R. Leonard, de la Universidad del Noroeste, establece que el notable tamaño del cuerpo de *H. erectus* necesitaba una dieta más rica en energía que la requerida por sus precursores de menos talla. La adopción de ese régimen, que incorporaba carne, les habría obligado a explorar nuevos territorios en busca de comida, hasta llegar a Eurasia. Todavía no conocemos las dimensiones corporales exactas de los pobladores primitivos de Georgia, pero con el descubrimiento de individuos más chaparros que el clásico *Homo erectus*, fuera de Africa, habría que replantearse ese cuadro expositivo.

Georgia en su mente

Cualquiera que fuere el motivo por el que los primeros homínidos abandonaron Africa, no resulta difícil



imaginar las razones que tuvieron para asentarse en Georgia meridional. Por un lado, la presencia del mar Negro al oeste y del Caspio al este les aseguraba un clima suave, quizás incluso mediterráneo. Por otro, la región ofrecía una extraordinaria diversidad ecológica; en el yacimiento se han hallado restos de animales que viven en bosques (ciervos), junto con especies de pastos (caballos), lo que indica un mosaico de hábitats de bosque y sabana. En la práctica, si estos homínidos hubiesen sufrido algún contratiempo no habrían necesitado trasladarse muy lejos para mejorar su situación. La heterogeneidad del entorno pudo haber favorecido el poblamiento. En concreto, Dmanisi se encuentra en un promontorio formado por la confluencia de dos ríos; esa ubicación podría haber atraído a los homínidos: el agua que les abastecía les proporcionaba también posibles presas sedientas.

Martha Tappen, de la Universidad de Minnesota, lo considera un lugar óptimo para la interacción entre especies. Entre los miles de fósiles mamíferos desenterrados en el yacimiento, se han encontrado, amén de restos humanos, fósiles de tigres de diente de sable, panteras, osos, hienas y lobos. Tappen, cuya investigación se centra en el origen de la acumulación de los huesos del yacimiento, sospecha que los grandes carnívoros utilizaban a modo de trampa este promontorio limítrofe con el agua; se plantea si los homínidos no harían lo propio. Tappen ha identificado ya señales de corte en huesos de animales. En alguna ocasión, por lo menos, los pobladores de Dmanisi consumieron carne. No sabemos, sin embargo, si eran carroñeros de presas animales o eran ellos cazadores. El asunto merece investigarse.

Entre las demás hipótesis restantes sobre la emigración de los homínidos hacia esas tierras septentrionales se cuenta la que sostiene que la transición de una dieta australopitecina, vegetariana, a una estrategia de subsistencia de cazador-recolector les permitió sobrevivir durante los meses fríos de invierno, cuando los recursos vegetales escaseaban o incluso desaparecían. Sólo un análisis más profundo de los huesos de mamíferos del yacimiento nos permitirá esclarecer cómo conseguían su ración de carne los homínidos de Dmanisi. Tappen imagina que serían cazadores; de haberse alimentado de carroña, la distribución de los animales habría resultado más errática. Si bien carnívoros, los homínidos no ocuparon necesariamente la cima de la cadena trófica: podrían haber sido a la vez cazadores y presas. Prueba de ello son las heridas incisas observadas en uno de los cráneos y las marcas de mordeduras que muestra la mandíbula mayor; nos revelan que algunos homínidos de Dmanisi fueron depredados por felinos.

Rumbo al exterior

Los restos fósiles de Dmanisi certifican que los homínidos salieron de Africa hace 1,9 millones de años, poco después de la aparición de *H. erectus*. Hacia dónde se dirigieron después se halla envuelto en el misterio. Los siguientes fósiles más antiguos de Asia sólo tienen algo más de un millón de años (aunque los controvertidos yacimientos de Java se fechan en 1,8 millones de años). Los más antiguos de Europa cuentan 800.000 años. Desde el punto de vista anatómico, los homínidos de Dmanisi podrían ser precursores del *H. erectus* de Asia, aunque también podrían haber formado un grupo sin continuidad evolutiva, es decir, la vanguardia de una oleada migratoria que sólo llegó a poblar una parte de Eurasia. Hubo múltiples emigraciones de Africa y también algunos retornos. Según Lordkipanidze, Dmanisi constituye una instantánea fotográfica; necesitamos saber qué ocurrió antes y después.

Por recurrir a un tópico paleoantropológico, los descubrimientos de Dmanisi plantean más preguntas que respuestas. Para Rightmire, cuestionarse las hipótesis recibidas siempre resulta provechoso, pero presenciar el derrumbamiento de ideas que hace 8 o 10 años parecían muy sólidas genera frustración. La transición hacia una dieta de carne podría explicar cómo se desenvolvieron para sobrevivir los homínidos fuera de Africa. Ahora bien, ¿qué les indujo a explorar nuevos horizontes? Quizá siguieron a las manadas que avanzaban hacia el norte. O, tal vez, fue algo tan sencillo como la inquietud por averiguar qué había detrás de una colina, un río o más allá de una pradera.

Los fósiles recuperados en Dmanisi proceden de un sector muy restringido de lo que se supone que abarca el yacimiento. Los nuevos hallazgos se producen a un ritmo mucho mayor que el que permite su descripción. Un cuarto cráneo, desenterrado en 2002, todavía se encuentra en fase de preparación y estudio; en el verano de 2003 se hallaron una nueva mandíbula, una tibia y un hueso del tobillo. En la lista de fósiles más deseados por los paleontólogos se encuentran los fémures y las pelvis, que nos revelarían las proporciones corporales de estos colonizadores y su capacidad para recorrer largas distancias. Todo parece indicar que se dará con ellos.

Bibliografía complementaria

THE HUMAN CAREER: HUMAN BIOLOGICAL AND CULTURAL ORIGINS. Segunda edición. Richard G. Klein. University of Chicago Press, 1999.

EARLIEST PLEISTOCENE HOMINID CRANIAL REMAINS FROM DMANISI, REPUBLIC OF GEORGIA: TAXONOMY, GEOLOGICAL SETTING, AND AGE. Leo Gabunia, Abesalom Vekua, David Lordkipanidze et al. en *Science*, vol. 288, páginas 1019-1025; 12 de mayo de 2000.

THE ENVIRONMENTAL CONTEXT OF EARLY HUMAN OCCUPATION IN GEORGIA (TRANSCAUCASIA). Leo Gabunia, Abesalom Vekua, David Lordkipanidze en *Journal of Human Evolution*, vol. 38, n.º 6, páginas 785-802; junio de 2000.

A NEW SKULL OF EARLY *HOMO* FROM DMANISI, GEORGIA. Abesalom Vekua, David Lordkipanidze, G. Philip Rightmire et al. en *Science*, vol. 297, páginas 85-89; 5 de julio de 2002.

INCIDENCIA DE LA DIETA EN LA HOMINIZACIÓN. William R. Leonard en *Investigación y Ciencia*, febrero de 2003.

GATAGCGCGACGAGCCAGCGCTCTAGACAGACGTAGCCGCGCGGATAGCGACGAGCCAGTCCGCGGACAGTACA

El nacimiento de la epigenética

El ADN se consideraba hasta hace poco el único depósito de información genética. Pero comienza ya a entreverse, en el interior de los cromosomas, otra capa de información mucho más maleable

W. Wayt Gibbs

"El genoma humano ensartado en un chip", se leía en un titular reciente de la portada del *New York Times*. El artículo comentaba que tres empresas biotecnológicas habían conseguido registrar en un pequeño artefacto del tamaño de una uña la actividad de todos los genes de una muestra de tejido humano. Así se cumplía uno de los objetivos del Proyecto Genoma Humano: identificar genes, es decir, fragmentos de ADN que, transcritos en ARN, se traducen en proteínas.

Cuando se publicó el borrador final de la secuencia del ADN de *Homo sapiens* en abril de 2003, muchos afirmaron que esa hilera de 3000 millones de bases A, T, G y C encerraba los planos de la vida, el libro de la herencia o el código fuente de las células. Pero, a decir verdad, todas esas metáforas resultan engañosas.

El genoma, la información heredable que contienen los cromosomas y dirige el desarrollo de un organismo, no consiste en un texto estático que se transmite de una generación a la siguiente. Antes bien, se trata de una compleja máquina bioquímica. Opera en un espacio tridimensional y consta de distintos elementos dinámicos que interaccionan.

1. LOS GEMELOS IDENTICOS poseen idénticas secuencias de ADN. No obstante, en la mayoría de los casos en que uno de ellos adquiere una enfermedad de origen —esquizofrenia, trastorno bipolar o diabetes infantil—, su hermano se halla exento de la misma. Aunque podrían influir los factores ambientales, la investigación comienza a descubrir rasgos importantes que se transmiten por vía epigenética, a través de los cromosomas pero fuera del ADN.

GATAGCGCGGAGCCAGCGCGCTCTAGACAGACGTAGCATATCGGATAGCGACGAGCCAGTCCGCGCGGACAGTAC



RANDY HARRIS

Los genes codificadores de proteínas constituyen uno más de esos elementos. Sin embargo, pese a representar menos del dos por ciento del ADN total en cada célula humana, el dogma central de la biología molecular los ha venido considerando, en el curso de los cinco últimos decenios, los únicos depósitos de la herencia. De ahí la identificación del genoma con un plano o proyecto.

Ya en los años sesenta, se había descubierto información oculta en otras dos zonas de los cromosomas. Una se encontraba escondida en la región no codificadora del ADN. La otra permanecía fuera de la secuencia de ADN. Pero la ingeniería genética siguió dirigiendo su mirada hacia los genes codificadores y las proteínas, pues éstas continuaban siendo las estructuras mejor conocidas.

En los últimos años, se ha explorado con mayor atención las partes menos evidentes del genoma, con la esperanza de encontrar allí la explicación de fenómenos que contradicen su dogma central: enfermedades de caracterización familiar que aparecen de una manera impredecible o incluso sólo en uno de dos gemelos idénticos; genes que, sin mediar mutación, se activan o desactivan en tumores; clones que habitualmente mueren en el útero. Se ha visto que esas segunda y tercera capas de información, distintas de los genes codificadores de proteínas, intervienen en la herencia, el desarrollo y la enfermedad.

La segunda capa de información oculta yace en innumerables genes de sólo ARN secuestrados dentro de hileras extensas de ADN no codificador [*véase* "El genoma oculto", por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2004]. Por no determinar proteínas, ese ADN se había reputado escoria inútil de la evolución. Pero sabemos ahora que los genes no codificadores dan lugar a ARN activos, que alteran el comportamiento de los genes codificadores. El funcionamiento incorrecto de estos genes de sólo ARN acarrea graves consecuencias.

El tercer componente del mecanismo genómico, de importancia presumiblemente mayor que el segundo, estriba en la capa epigenética de información almacenada en las proteínas y metabolitos que rodean y se adhieren al ADN. Tales señales epigenéticas, así se llaman, aunque no alteran la secuencia del ADN subyacente, pueden afectar gravemente la salud y las características de un organismo. Algunas pasan incluso de padres a hijos.

No se conocen los mecanismos de interacción entre los indicadores epigenéticos y los restantes componentes del genoma. Mas, por lo que se sabe de la investigación sobre mecanismos críticos, parece que el papel de la zona epigenética resulta crucial para el desarrollo, el envejecimiento y el cáncer. Se sospecha también que las "epimutaciones" contribuyen al desarrollo de la diabetes, la esquizofrenia, el trastorno bipolar y otras enfermedades complejas.

La epigenética puede sugerir nuevos tratamientos contra esas patologías. Al propio tiempo que protegen su ADN contra la mutación, las células añaden o borran rutinariamente indicadores epigenéticos. En principio, los fármacos podrían conjugarse con el código epigenético para activar o desactivar los genes nocivos. Con medicinas novedosas podría revertir algunas de las alteraciones genéticas que acompañan el envejecimiento y preceden al cáncer.

Resumen/*Epigenética*

- La mayoría de los caracteres se transmiten a través de los genes codificadores de proteínas. Pero existe otro código que ejerce también efectos importantes sobre la salud y el aspecto de los organismos. Se escribe con marcadores químicos y se encuentra fuera de la secuencia de ADN.
- El código epigenético podría explicar por qué algunas enfermedades hereditarias saltan a través de generaciones o afectan sólo a uno de dos gemelos. Los errores epigenéticos no serían ajenos al cáncer.
- El genoma opera como una máquina con elementos diversos y complejos en interacción. El componente epigenético debería resultar más fácil de modificar por medios farmacológicos de lo que ha sido la secuencia de ADN.

Ancas robustas

La historia que sigue constituye una metáfora esclarecedora sobre la conjura de los tres componentes del genoma para acabar con la presentación clásica de la herencia. En 1983, en un rancho de Oklahoma nació un carnero cuyas ancas alcanzaron proporciones prodigiosamente ricas en contenido cárnico. Intuyendo los beneficios económicos de la mutación, el ranchero llamó al cordero Oro Macizo y lo conservó como semental.

A los hijos de Oro Macizo, que también gozaban de nalgas robustas, los cruzaron con ovejas normales. El aspecto de la mitad de la descendencia, tanto machos como hembras, se asemejaba al paterno. Recibieron el nombre de *callipyge*, que en griego significa "traseros hermosos". Suponiendo que se trataba de una mutación en un gen dominante, cabía esperar que la mitad de sus descendientes nacieran con las ancas rollizas. El resultado, sin embargo, fue un tanto extraño. Cuando las hembras *callipyge* se cruzaron con machos normales, ni un solo cordero de cualquier sexo presentó los glúteos de la madre, aun cuando había algunos que heredaron la mutación. Parecía como si el *callipyge* hubiera cambiado de dominante a carácter recesivo.

Se procedió luego a cruzar carneros de aspecto normal, aunque portadores de la mutación, con ovejas normales. Para sorpresa de todos, la mitad de la descendencia resultó *callipyge*. Así pues, el rasgo aparecía sólo cuando la mutación se heredaba del padre.

Si el *callipyge* fuera un gen habitual, los animales que heredaran la forma mutante del padre y de la madre tendrían las ancas robustas bien aseguradas. Sin embargo, todos los corderos con dos alelos *callipyge* (con la misma mutación en ambas copias del cromosoma) presentaban un aspecto perfectamente normal. ¿Qué ocurría?

Tras diez años de experimentos se ha dado, por fin, con la respuesta. En mayo de 2003, el equipo de Michel



2. LAS ANCAS ROBUSTAS distinguen a una oveja *callipyge* (*extremo izquierda*) y un carnero *callipyge* (*centro derecha*) de sus hermanos normales. El patrón hereditario del rasgo *callipyge* se debe a la interacción entre tres capas distintas de información que yacen en el genoma.

SAM JACKSON *Universidad Técnica de Texas*

Georges, de la Universidad de Lieja, publicó la descripción del rasgo y la genealogía *callipyge*: un gen codificador de proteína, uno o más genes de sólo ARN y dos efectos epigenéticos. Súmese a esa triada, una pequeña mutación (una base G aparece en lugar de A en medio de un erial génico, a 30.000 bases de distancia del gen conocido más cercano).

La sustitución de A por G torna hiperactivos los genes *callipyge*, de suerte que se produce una cantidad excesiva de proteína o ARN activo en las células musculares. El exceso de proteína explica el volumen trasero, pero no el extraño patrón de herencia. Muchos ven ahí la acción de la impronta genómica en el árbol familiar.

Para la mayoría de los genes, ambos alelos, el materno y el paterno, se activan o desactivan simultáneamente. La impronta rompe ese equilibrio. En los genes afectados por la misma sólo se expresa la versión que procede del padre; se silencia el alelo materno. Así opera el gen codificador implicado en el *callipyge*. El cordero que recibe la mutación (G en vez de A) de la madre muestra un aspecto normal. La mutación no supera la censura selectiva que impone la impronta genómica.

La misma impronta, ahora en sentido opuesto, afecta al gen (o genes) *callipyge* de sólo ARN. Estos ARN activos se producen únicamente a partir del alelo en el cromosoma materno. Así, el rasgo desaparece en animales que portan dos alelos *callipyge*.

En estos corderos con doble mutación, el gen codificador de proteína del cromosoma paterno se hiperactiva, al tiempo que los genes no codificadores del cromosoma materno también aumentan la producción de ARN activo. El exceso de ARN bloquea la señal amplificada de crecimiento y el animal resulta esbelto.

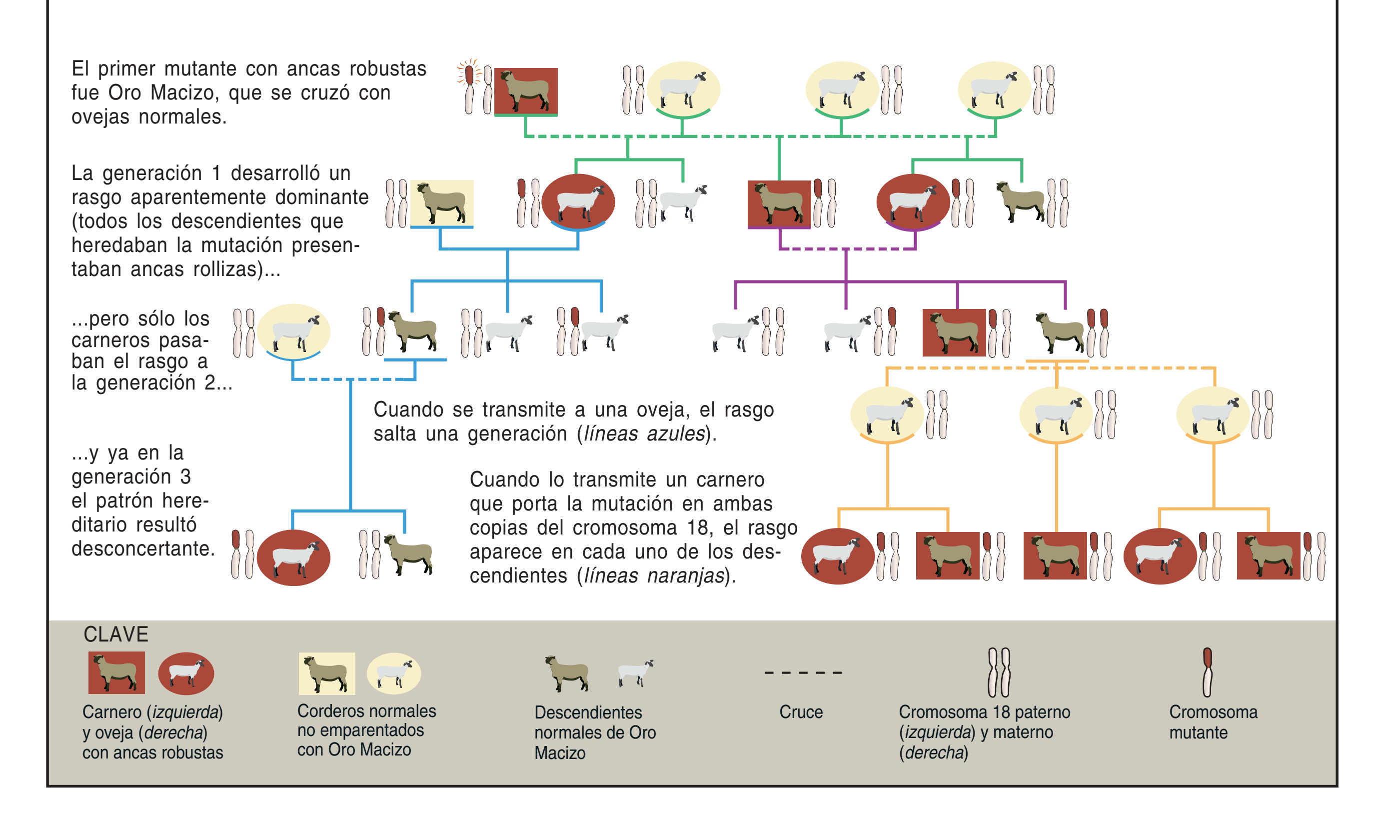
La superdominancia ejercida por la interación de este par de alelos constituye una rareza. No lo es, sin embargo, el fenómeno de la impronta, al menos en las plantas con flores. Randy L. Jirtle, de la Universidad de Duke, mantiene actualizada una lista de genes humanos sujetos a la impronta genómica. A finales de 2003 alcanzaba los 75. Maxwell P. Lee, del estadounidense Instituto Nacional del Cáncer, publicó en agosto de 2003 que, de un barrido de 602 genes en siete personas, un alelo resultaba significativamente más activo que el otro en la mitad de los genes. En 170 de esos genes, las diferencias de expresión alélica se cuadruplicaba de lejos.

En los primeros días después de la concepción, desaparece de los cromosomas casi toda la impronta genómica. Ignoramos por qué. Antes del ecuador de la gestación, se restablece la información epigenética. En ese proceso de reprogramación, sin embargo, se producen algunos errores.

El gen humano del factor de crecimiento 2 de la insulina (*IGF2*), por ejemplo, suele hallarse sujeto a una impronta genómica que desactiva la copia materna. Pero en una de cada diez personas, no hay tal. Según Carmen Sapienza, de la Universidad de Temple, ese defecto se encuentra presente en el 40 por ciento de los pacientes con cáncer esporádico de colon. Se trata sólo de

ARBOL FAMILIAR

HACE VEINTE AÑOS nació Oro Macizo, un carnero singular que, en virtud de una mutación en el cromosoma 18, presentaba unas ancas poderosas. Oro Macizo transmitió este rasgo a la mitad de la descendencia (*líneas verdes*), de acuerdo con el patrón típico de un gen dominante. En generaciones posteriores, sin embargo, se observó que los individuos que heredaban la mutación de la madre mostraban un aspecto normal (*líneas azules*), incluso cuando le acompañara la mutación del padre (*líneas púrpuras*). A causa de los efectos epigenéticos, los únicos corderos que desarrollan ancas robustas son los que reciben una sola copia de la mutación y ésta proceda del padre (*líneas naranjas*).



FUENTE: CAROLE CHARLIER Y MICHEL GEORGES *Universidad de Lieja, Bélgica*; NADIA STRASSER (*ilustración*)

una asociación, pero merece la pena tenerse en cuenta. De hecho, la pérdida de la impronta genómica del *IGF2* (que se detecta mediante un test sanguíneo) constituye en la actualidad un criterio predictivo del cáncer de colon. Una impronta defectuosa resulta también un buen indicio de enfermedades genéticas menos frecuentes como los síndromes de Prader-Willi, Angelman y Beckwith-Wiedemann. Este último causa deformidades faciales y conlleva un riesgo elevado de cáncer en la infancia.

Para Emma Whitelaw, de la Universidad de Sidney, las variaciones epigenéticas explicarían discordancias extrañas de enfermedades entre gemelos idénticos, que se caracterizan por compartir secuencias de ADN idénticas. Ahora bien, cuando uno adquiere una enfermedad de componente genético —esquizofrenia, trastorno bipolar o diabetes infantil—, el otro gemelo normalmente no la padece. En 2002, el grupo de Rachel Weksberg, del Hospital Pediátrico de Toronto, comparó gemelos discordantes ante el síndrome de Beckwith-Wiedemann: en todos los casos, el gemelo afectado había perdido la impronta genómica en un área crítica del cromosoma 11, no así su hermano sano.

Francis Collins, director del estadounidense Instituto Nacional de Investigación sobre Genoma Humano, sostiene que la impronta constituye un factor muy importante para el cáncer, el desarrollo y los defectos de nacimiento. Pese a reconocer que se desconoce su mecanismo de operación, admite la posibilidad de que intervenga la metilación del ADN.

Metilos epigenéticos

Simple pero poderoso, un metilo consta de tres hidrógenos unidos a un carbono con tendencia a enlazarse a otra molécula (para metilarla). El metilo muestra una afinidad especial hacia las citosinas (C) del ADN. Existen enzimas que se dedican a tomar moléculas metiladas derivadas de nutrientes básicos, tales como el ácido fólico y la vitamina B_{12}, y pegarlas a ciertas bases C del genoma.

En general, cuanto más metilada se halla una hebra de ADN, menor es la probabilidad de que ésta se transcriba en ARN. El alelo silente de un gen sujeto a impronta, por ejemplo, se encuentra casi siempre muy metilado. Sin embargo, parece que la metilación del ADN se ocupa, sobre todo, de defender el genoma frente a los transposones, fragmentos parasitarios de

ADN; la impronta vendría a ser una labor secundaria de la metilación.

Nuestro ADN está lleno de parásitos. Aproximadamente el 45 por ciento de la secuencia del genoma humano consiste en genes víricos (o fragmentos de genes) que se han copiado a sí mismos en el genoma en el transcurso de la evolución. Afortunadamente para nosotros, casi todo este ADN "egoísta" se encuentra muy metilado y, por tanto, inactivo.

Jirtle acaba de demostrar el vínculo entre metilos y transposones en un experimento realizado con ratones agutí, cuyo color de la piel varía del amarillo al negro bajo el control de un elemento parasitario. Un grupo de hembras preñadas siguió una dieta normal. Alrededor del 60 por ciento de sus descendientes desarrollaron una piel amarilla. Otro grupo se alimentó con un pienso enriquecido con vitamina B_{12}, ácido fólico y otras fuentes de metilo. El 60 por ciento de las crías de este segundo grupo mostró una piel de color pardo. El cambio se debía a un aumento en la metilación (y reducción de la expresión) del ADN transposón del agutí.

Pero, ¿qué ocurre cuando fallan tales defensas metílicas? Hace unos seis años, mediante técnicas de ingeniería genética se bloqueó una de las enzimas que añaden grupos metilos en células madre embrionarias. Con la protección metílica rebajada, se activaron muchos transposones. La tasa de mutaciones en el ADN se decuplicó. Los resultados planteaban una hipótesis sugestiva: ¿Podrían las anomalías epigenéticas acelerar, o incluso iniciar, el descontrol genético que conduce al cáncer?

Al fin y al cabo, las células tumorales presentan a menudo una distribución irregular de las marcas epigenéticas: su genoma, en general, se encuentra escasamente metilado, mientras que algunos genes muestran una metilación excesiva y evitan con ello que las células dañadas se vuelvan malignas. Para Stephen B. Baylin, de la Universidad Johns Hopkins, en los pólipos del colon (neoformaciones benignas que suelen volverse malignas), la metilación del genoma se reduce considerablemente incluso antes de que, en el camino hacia el cáncer, las mutaciones silencien genes supresores clave.

Se ignora por qué se produce tal desmetilación del ADN. Ninguna enzima desmetilante se ha identificado hasta ahora. Se sospecha que los cromosomas pobres en grupos metilo tienden a funcionar peor durante la división celular. Por tanto, constituyen un primer paso hacia la malignidad. El trabajo de Rudolph Jaenisch, del Instituto Whitehead del MIT, aportó un aval para tal hipótesis. Su grupo creó ratones transgénicos con una deficiencia congénita de una enzima metilante. En la mayoría de los ratones, al menos uno de los cromosomas pobremente metilados se hizo inestable. Las mutaciones no tardaron en acumularse; el 80 por ciento de los individuos murieron de cáncer antes del noveno mes de vida.

La idea de que la carencia de metilos en el ADN desemboque en un cáncer en el hombre se mueve todavía en el terreno de la hipótesis; en cualquier caso, no existen fármacos que corrijan una baja metilación del genoma. Pero se están ensayando diversos fármacos contra el cáncer que actúan sobre la otra vertiente de la metilación: la que sufren en demasía ciertos genes asociados al cáncer. Hasta hace poco, muchos pensaban que, para que un tumor se asentase, era preciso que una mutación silenciara los genes oncosupresores. Sin embargo, en muchas células tumorales estos genes supresores poseen secuencias normales de ADN. Los errores de metilación, no las mutaciones, son los que dejan inoperantes a los genes.

Se están ensayando, en esta dirección, varias sustancias anticancerosas que abordan el problema de la metilación excesiva. La procaína (un anestésico), el ácido valproico (un estabilizador del talante) y la decitabina (un agente empleado en quimioterapia) parecen arrancar metilos del ADN o impedir que se peguen a las células recién formadas. Jean Pierre Issa, del Centro Oncológico M. D. Anderson de la Universidad de Texas, ha sometido la decitabina a ensayo en pacientes con leucemia avanzada. Lo mismo que la mayoría de las sustancias utilizadas en quimioterapia, el compuesto resulta bastante tóxico. Pero cuando el fármaco ejerce su acción, se vence la leucemia: el 99,9 por ciento de las células cancerosas desaparecen. De acuerdo con la información aportada, ocho de los 130 pacientes tratados se recuperaron y en otros 22 la medicina desmetilante dejó la enfermedad en una remisión parcial.

Sabine Maier, de la empresa Epigenomics, que trabaja en asociación con la compañía Roche en el desarrollo de diagnósticos del cáncer basados en la metilación, afirma que, pese a resultar prometedores, todos estos fármacos conllevan un problema: su acción se funda en la desmetilación de todo el genoma, lo que podría acarrear efectos secundarios. Además, el efecto pudiera ser temporal, con recidiva de las marcas metílicas y silenciamiento de los genes oncosupresores. Issa admite la posibilidad del carácter transitorio de las modificaciones inducidas en la expresión del gen; pero si los cambios permiten que el sistema inmunitario identifique la célula tumoral o inducen la apoptosis (muerte celular programada), entonces la célula seguiría anulada.

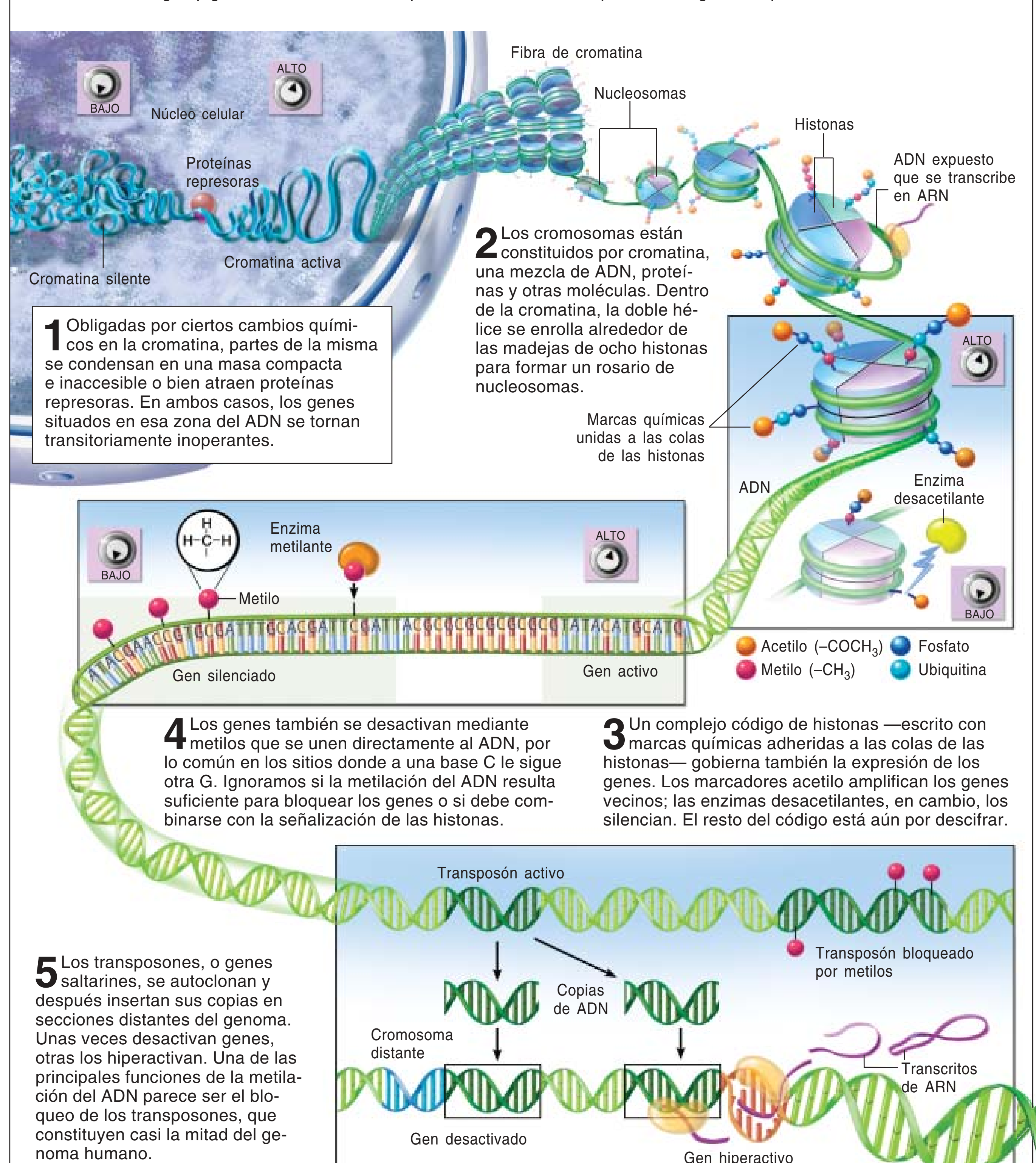
Descifrar el código

La reemergencia de un patrón de metilación del ADN después de la acción de los fármacos desmetilantes constituye un extraño eco de la reprogramación de las marcas de impronta poco después de la concepción. ¿Qué redirige las enzimas metilantes hacia esos genes supresores de tumores o esos pocos alelos marcados para la impronta genómica?

Hay que ofrecer una respuesta si queremos acometer el proceso de clonación animal. La reprogramación epigenética fracasa estrepitosamente en los clones obtenidos al sustituir, por ADN de una célula adulta, el ADN de un óvulo fecundado. La mayoría de esos clones presenta patrones anormales de metilación y de expresión génica. Aun cuando su secuencia de ADN sea correcta, el 90 por ciento de los animales muere antes del parto y la mitad de los que nacen vivos no llega a la edad adulta. Los pocos que sobreviven hasta

CONTROL EPIGENETICO DEL “VOLUMEN” DE LOS GENES

LA SECUENCIA DE ADN no constituye el único código almacenado en los cromosomas. Los fenómenos epigenéticos controlan el “volumen” de los genes: amplifican o silencian su actividad. El código epigenético está constituido por un sistema de moléculas unidas al ADN o a las histonas que regulan su morfología en el interior cromosómico. Entre otras funciones, los controles epigenéticos se encargan de amordazar los transposones, fragmentos parasitarios de ADN.



1 Obligadas por ciertos cambios químicos en la cromatina, partes de la misma se condensan en una masa compacta e inaccesible o bien atraen proteínas represoras. En ambos casos, los genes situados en esa zona del ADN se tornan transitoriamente inoperantes.

2 Los cromosomas están constituidos por cromatina, una mezcla de ADN, proteínas y otras moléculas. Dentro de la cromatina, la doble hélice se enrolla alrededor de las madejas de ocho histonas para formar un rosario de nucleosomas.

3 Un complejo código de histonas —escrito con marcas químicas adheridas a las colas de las histonas— gobierna también la expresión de los genes. Los marcadores acetilo amplifican los genes vecinos; las enzimas desacetilantes, en cambio, los silencian. El resto del código está aún por descifrar.

4 Los genes también se desactivan mediante metilos que se unen directamente al ADN, por lo común en los sitios donde a una base C le sigue otra G. Ignoramos si la metilación del ADN resulta suficiente para bloquear los genes o si debe combinarse con la señalización de las histonas.

5 Los transposones, o genes saltarines, se autoclonan y después insertan sus copias en secciones distantes del genoma. Unas veces desactivan genes, otras los hiperactivan. Una de las principales funciones de la metilación del ADN parece ser el bloqueo de los transposones, que constituyen casi la mitad del genoma humano.

la madurez son proclives a la obesidad y enfermedades del sistema inmunitario.

Para prevenir o anular permanentemente los errores de metilación, tan habituales en clones, tumores y afecciones vinculadas a la impronta genómica, resulta necesario descifrar un código epigenético, separado del ADN. Baylin sostiene que la metilación, por sí sola, no silencia los genes; se encarga únicamente de fijar su estado silente. En cuanto a las enzimas metilantes, parece que reciben sus órdenes de alguna otra parte.

Un cromosoma se suele representar por un revoltijo azaroso de ADN. Pero si lo examinamos de cerca, encontramos algo muy distinto. Se trata de un conjunto dinámico de ADN, proteínas y otras moléculas. Este ensamblaje filamentoso, la cromatina, no sólo sirve de soporte del ADN, sino que controla también el acceso al mismo.

La cromatina contiene en ADN la mitad de lo que contiene en proteína, la mayoría de la cual está en forma de histonas. Las histonas constituyen la base del empaquetamiento del ADN nuclear. Los 1,8 metros de ADN se enrollan alrededor de los carretes de histonas para formar una cadena en forma de rosario que después se pliega como una madeja. Las secciones de cromatina pueden condensarse o expandirse de forma independiente. Así, ciertas zonas de ADN se ocultan eficazmente, al tiempo que otras quedan expuestas para la transcripción.

Las hembras, por ejemplo, comienzan su vida con dos cromosomas X activos. Los machos heredan sólo uno. Un embrión femenino debe embozar el X extra para evitar que sus células obtengan una dosis doble de lo que producen los genes de los cromosomas X. Para conseguirlo, dos partes de la máquina genómica conspiran para desactivar la tercera. Un gen no codificador llamado *Xist* produce un ARN activo que recubre el cromosoma X redundante. Al propio tiempo, el cromosoma X necesario produce ARN antisentido que lo protege del *Xist*. Una reacción en cadena se propaga a lo largo del cromosoma sobrante: los metilos marcan una buena parte del ADN, las histonas se desprenden de los grupos acetilo ($—CO\text{-}CH_3$) de sus colas y la cromatina se compacta en una masa inaccesible cubierta de ARN. El cromosoma X silente se entrega entonces inactivo a cada célula portadora del genoma, conforme la hembra avanza en su desarrollo.

Aunque todavía no se conoce con precisión el papel de las histonas en esta historia, la investigación reciente ha demostrado que las colas proteicas que sobresalen de las histonas catalizan una gran variedad de adiciones químicas. En aquellas zonas donde los acetilos adornan las histonas, por ejemplo, la cromatina habitualmente se encuentra abierta para realizar su función; permite que la maquinaria de transcripción de la célula lea el ADN en esa parte del cromosoma.

La cromatina silente, compacta, carece generalmente de acetilos en las posiciones especiales. En cambio, muestra metilos insertos en diferentes puntos de las colas de las histonas. Las histonas acogen también fosfatos y ubiquitina, un péptido. Todas estas marcas aparecen en una asombrosa variedad de localizaciones y combinaciones. Descifrar el código de las histonas no va a resultar nada fácil.

A diferencia del código estático del ADN, numerosas marcas epigenéticas se hallan en flujo constante. Cuando una sección de la cromatina se condensa, el silenciamiento puede extenderse por todo el cromosoma hasta alcanzar una barrera. Xin Bi, de la Universidad de Rochester, identificó recientemente elementos fronterizos que atraen enzimas acetilantes hacia las histonas para asegurar que permanezcan activas. En ocasiones, una separación física ofrece suficiente espacio para que el ADN flote libre de histonas; es ahí donde se detiene la propagación del silenciamiento. En otros lugares no existe frontera, sino un tira y afloja entre las regiones activas y silentes del cromosoma.

Issa sostiene que esta pugna podría explicar por qué el riesgo de padecer cáncer crece con la edad. Tal vez las barreras que en los cromosomas separan las regiones muy condensadas, altamente metiladas y silenciosas de las regiones activas, accesibles y no metiladas se desintegran con el paso de los años, a medida que las células se dividen o envejecen.

Con todo, las zonas más ocultas del genoma se perciben sólo en penumbra. Tras el hito que supuso la coronación del Proyecto Genoma Humano importa ahora alcanzar una descripción semejante del panorama epigenético. En octubre de 2003, Epigenomics y el Instituto Sanger del Consorcio Wellcome, emprendieron el Proyecto Epigenoma Humano: un plan de investigación de cinco años para cartografiar los sitios de metilación del ADN. Habían levantado ya el mapa de más de 100.000 marcas metílicas unidas al complejo principal de histocompatibilidad, un sector del cromosoma 6 vinculada a muchas enfermedades.

La nueva concepción de la naturaleza del genoma abre nuevas vías a la ingeniería genética. Los genes codificadores de proteínas, importantes e inmutables, no constituyen la única fuente de instrucciones para las células. El ADN no codificador cumple también una función destacada, al par que las histonas, las señales químicas unidas al ADN y la forma de la cromatina.

Bibliografía complementaria

THE EPIGENOME: MOLECULAR HIDE AND SEEK. Dirigido por Stephan Beck y Alexander Olek. Wiley, 2003.

CONTROLLING THE DOUBLE HELIX. Gary Felsenfeld y Mark Groudinein en *Nature*, vol. 421, págs 448-453; 23 de enero de 2003.

THE CALLIPYGE LOCUS: EVIDENCE FOR THE *TRANS* INTERACTION OF RECIPROCALLY IMPRINTED GENES. Michel Georges, Carole Charlier y Noelle Cockett en *Trends in Genetics*, vol. 19, n.º 5, págs 248-252; mayo de 2003.

Terremotos de la antigüedad

La inspección geológica del subsuelo del lago de Lucerna saca a la superficie una secuencia de temblores prehistóricos

Michael Schnellmann, Flavio S. Anselmetti, Domenico Giardini, Judith A. McKenzie y Steven N. Ward

"El martes 18 de septiembre de 1601, poco antes de las dos de la madrugada, un intenso y aterrador temblor de tierra sacudió los aledaños de Lucerna... Nadie recordaba un acontecimiento parecido. Ni siquiera las crónicas de la ciudad se hacían eco de algo semejante en el pasado." Así comienza el informe de Renward Cysat, secretario municipal de Lucerna. Testigo presencial de los hechos, anotó con todo detalle la catástrofe que siguió a uno de los terremotos más violentos sufridos en Europa central. El temblor causó considerables daños en gran parte de Suiza. Se sintió también en puntos de Francia, Alemania e Italia. Los sismólogos estiman que, de haberse registrado con instrumentos modernos, el episodio hubiera alcanzado un 6,2 en la escala de Richter.

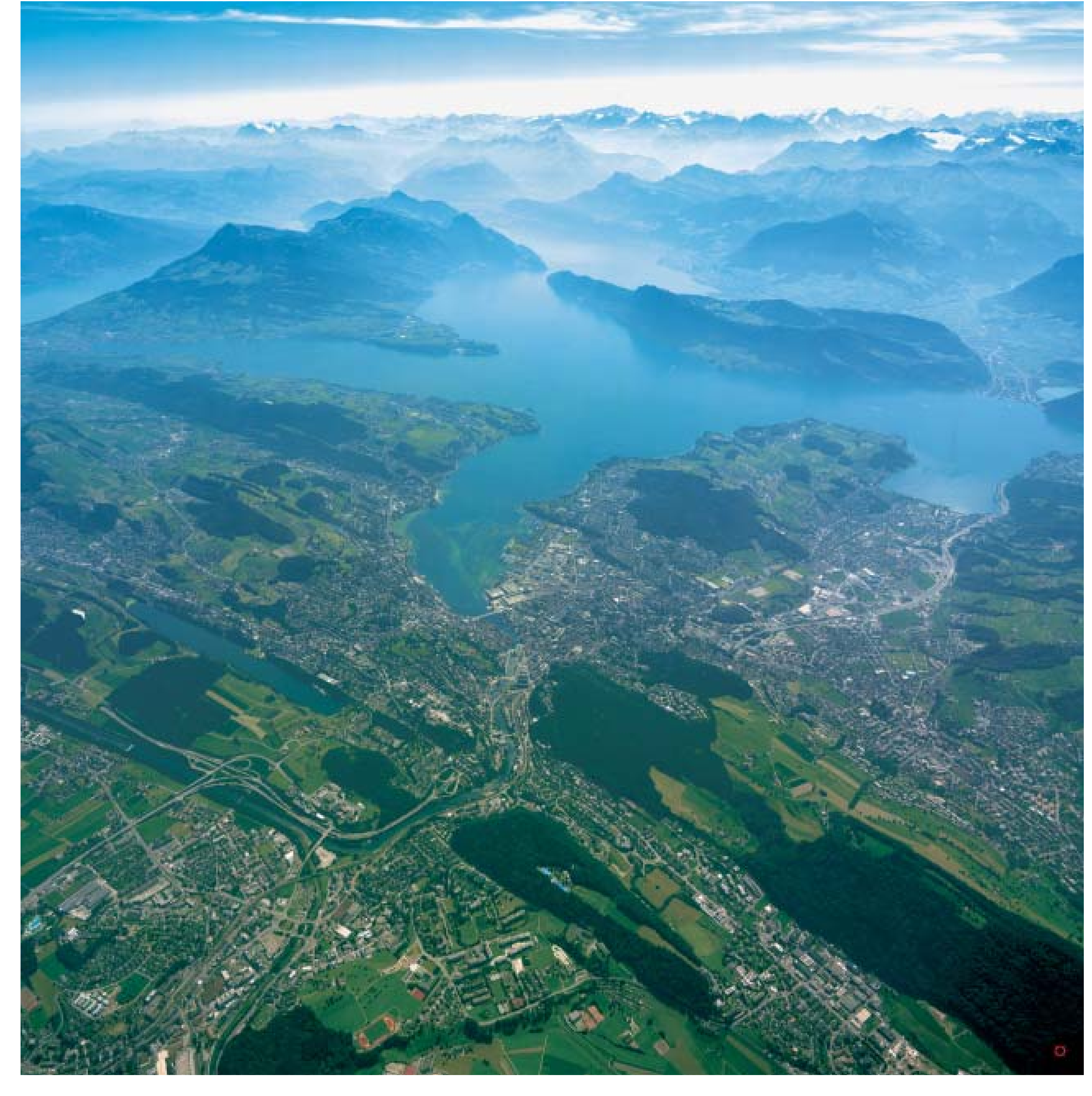
Los temblores de tierra forman parte de la cotidianidad en ciertas regiones del mundo (Japón, California, etcétera). En Suiza, en cambio, a pesar de convivir con la amenaza de aludes e inundaciones, nadie piensa en la posibilidad de un terremoto. Sin embargo, los archivos históricos revelan que este país centroeuropeo sufrió en la antigüedad varios seísmos que causaron considerables daños materiales y la pérdida de vidas humanas. El episodio de Lucerna en 1601 constituye un ejemplo. Otro similar ocurrió en 1356, que arrasó gran parte de la ciudad de Basilea.

Este último se considera el de mayor fuerza desatada en Europa central. Si otro del mismo tenor sacudiese la Suiza actual, la mortandad y la pérdida de bienes materiales alcanzaría cifras de auténtica catástrofe. Resulta, no obstante, difícil cuantificar los recursos necesarios para hacer frente a tal amenaza, si no se conoce la magnitud ni la frecuencia de los futuros terremotos. Este es el motivo por el cual tratamos de estimar los riesgos sísmicos en Suiza. Tarea ésta que requiere, como mínimo, un buen conocimiento de los tiempos de recurrencia (lapsos entre dos seísmos) de unos sucesos que allí son escasos aunque intensos.

Hasta hace muy poco, el catálogo de terremotos históricos se apoyaba en las mediciones sismográficas y en documentos escritos. En Suiza, el primer sismógrafo se instaló en 1911; el registro escrito abarca sólo el último milenio. Por tanto, las dos principales fuentes de información sísmica, si bien valiosas, resultan insuficientes para identificar los lugares que, en el pasado, sufrieron terremotos intensos en intervalos de pocos miles de años. Tales limitaciones constituyen un problema no pequeño, porque los tiempos de recurrencia dilatados son característicos de regiones que, como Suiza, se encuentran lejos de los bordes de placas tectónicas (donde se concentra la actividad sísmica).

La única forma de saber si antiguamente ocurrieron (y pueden volver a ocurrir) fuertes temblores de tierra en tales lugares es extender a tiempos prehistóricos el catálogo de sucesos conocidos. La información que necesitamos no se encuentra escrita, por tanto, sino que hemos de recuperarla del registro de lo acontecido en tales episodios impreso en la naturaleza. Nuestro trabajo comporta, pues, descubrir e interpretar los archivos geológicos para reconstruir la historia de los seísmos de un pasado lejano.

Los temblores sísmicos moderados o fuertes dejan huellas en el suelo o el subsuelo. En esos rastros se basan los paleosismólogos para abordar los terremotos prehistóricos. Cavan trincheras a través de la traza superficial de fallas activas, que les permiten determinar dónde y cuando ocurrieron los seísmos. Esta estrategia, sin embargo, no ofrece buenos resultados en zonas alejadas de los bordes de placas, donde las fracturas superficiales resultan escasas y difíciles de identificar. En dichas regiones interiores resulta más efectivo estudiar aquellos rasgos que registran el temblor del terremoto en un lugar concreto, independientemente



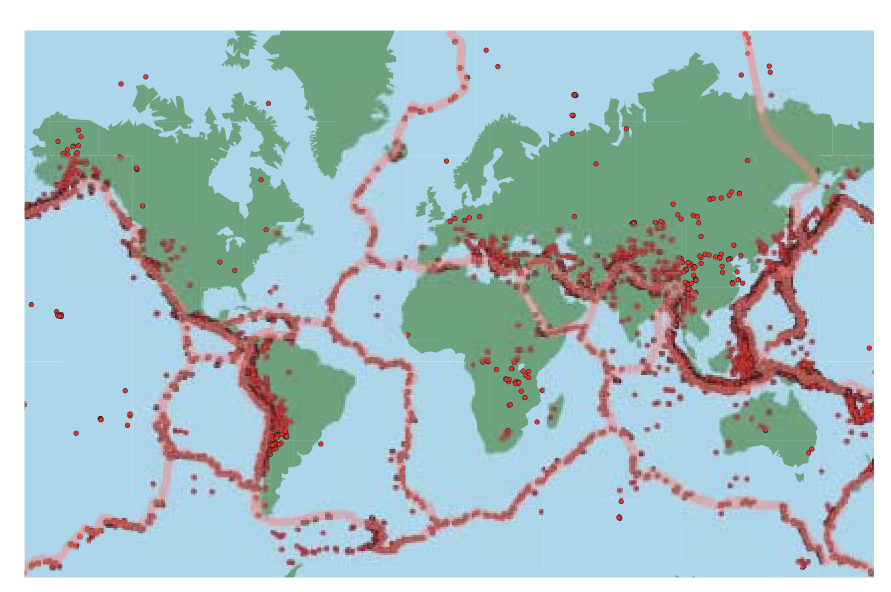
de la posición exacta de la falla que lo causó.

Para nuestra fortuna, un temblor de tierra conlleva numerosos efectos secundarios: las estalactitas se rompen, las rocas en equilibrio inestable caen, las pendientes escarpadas se tornan frágiles y los suelos arenosos fluyen licuescentes. Algunos de esos sucesos, sin embargo, ocurren también por otras razones: una estalactita, por ejemplo, puede romperse por la acción de su propio peso y un corrimiento de tierras puede deberse a una intensa lluvia. La labor del paleosismólogo ha de empezar por identificar el mecanismo desencadenante. Si se trata de un suceso sísmico, el próximo paso consistirá en datar las estructuras que deja en su estela.

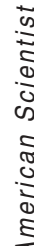
1. AUNQUE MUCHAS DE LAS PERSONAS que habitan en los aledaños del lago de Lucerna conviven con la amenaza de aludes, corrimientos de tierra y catástrofes naturales similares, son muy pocas las que piensan en la posibilidad de un terremoto. Pero esa región se ha visto sacudida en varias ocasiones por episodios sísmicos violentos. El que se produjo en 1601 causó daños considerables en la cuidad de Lucerna (*en la imagen*). Sin embargo, no hay constancia histórica de otros terremotos de magnitud similar, por lo que venía resultando muy difícil pronosticar la probabilidad de una recurrencia. Para estimar mejor ese riesgo, los autores emprendieron el estudio de los sedimentos que se acumulan bajo el lago. La inspección de este archivo natural reveló que otros cuatro grandes temblores destrozaron este pintoresco escenario en el curso de los últimos milenios.

Los sedimentos: archivos geológicos

Los sedimentos lacustres constituyen excelentes archivos de las condiciones ambientales del pasado. Acumulados año tras año, se han convertido en un registro completo, y en ocasiones detallado, de la historia geológica de lagos y lagunas. En las zonas que estudiamos del lago de Lucerna, los depósitos crecen, desde hace varios milenios, algo menos de un milímetro anualmente. La composición de este material



2. LA ACTIVIDAD SISMICA se concentra en los límites entre placas tectónicas (*líneas rosadas*). En ocasiones, sin embargo, algunos terremotos de gran magnitud se producen en el interior de las placas. Los puntos rojos indican los lugares que, desde 1973, han sufrido terremotos de magnitud 5,5 o superior. La ubicación de los bordes de las placas se ha obtenido del Proyecto de Descubrimiento de Bordes de Placas, de la Universidad de Rice. Los epicentros de los terremotos proceden del catálogo del Centro Nacional de Información de Terremotos, del Servicio Inspección Geológica de los EE.UU.



refleja las condiciones locales en la época de la deposición. El polen que trae el aire, por ejemplo, queda enterrado en el sedimento fangoso del fondo del lago; se convierte así en un registro de los cambios de la vegetación de las cercanías. Las capas de grano grueso, por su parte, nos retrotraen a épocas en que las inundaciones arrastraron residuos arenosos hasta el lago.

También los terremotos dejan sus huellas en el fondo de lagos y océanos: los temblores hacen que los sedimentos resbalen por las pendientes sumergidas de las márgenes de esas masas de agua. El terremoto de Grand Banks en 1929, por ejemplo, de magnitud 7,2 en la escala de Richter, desencadenó un deslizamiento gigantesco en la vecindad de las costas canadienses de Terranova. El desplazamiento brusco de materiales a lo largo de la pendiente continental originó un maremoto arrasador y cortó las comunicaciones transatlánticas cuando la masa ingente de espeso fango segó varios cables telefónicos submarinos que se encontraban en su camino.

Ante tales sucesos, nos pareció razonable pensar que los sedimentos de varios lagos suizos habrían registrado de forma semejante episodios sísmicos del pasado. Tras un extenso sondeo y estudio de las profundidades del lago de Lucerna se confirmó nuestra hipótesis: de acuerdo con los hallazgos, cuatro importantes terremotos sacudieron esta zona en tiempos prehistóricos.

El relato de Cysat

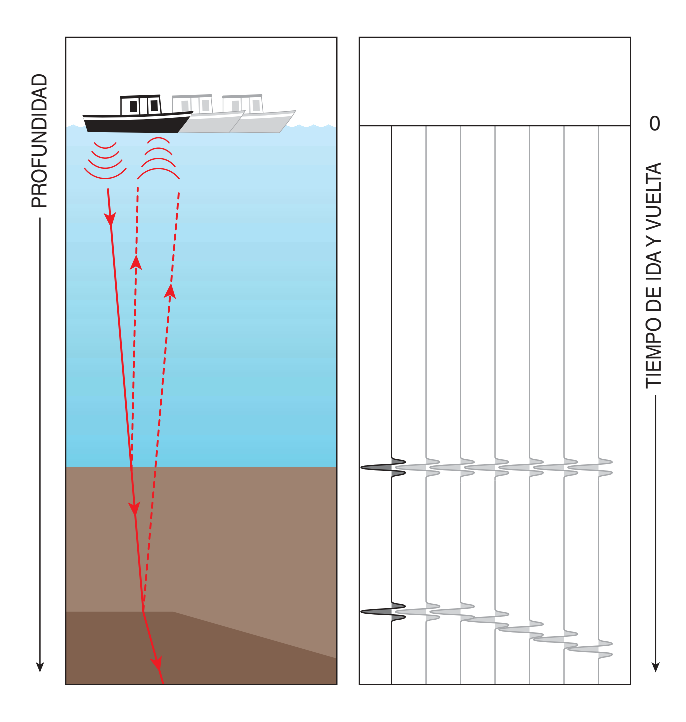
Nuestra primera tarea consistió en establecer qué clase de signatura sísmica debíamos buscar en los sedimentos del lago. Para ello, el informe de Cysat sobre el suceso de 1601 constituía un documento de valor incalculable. A la mañana siguiente al terremoto, él y sus compañeros del ayuntamiento cabalgaron hacia el lago para estimar los daños. Reseñó un cuadro caótico:

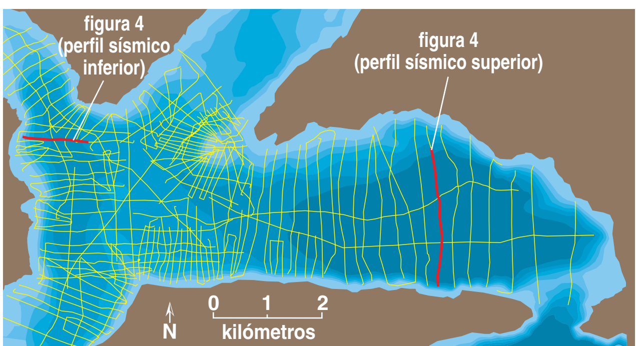
> A lo largo de la orilla encontramos embarcaciones, troncos, tablones, tubos y todo tipo de objetos. Unos flotaban a la deriva; otros habían sido arrojados a la playa y depositadas 50 pasos [de 40 a 50 metros] más allá de la línea costera y hasta dos halberds [de tres a cuatro metros] por encima del nivel del lago... Cerca de la ciudad, algunas personas recogían peces que habían sido arrojados hacia la ribera... En Lucerna, el maremoto había arrancado los amarres de las embarcaciones, que derivaban lago adentro. Andaban veloces, pero no por el viento, remos o velas... Preternaturalmente, el gran río Reuss [el desagüe del lago Lucerna] invertía el flujo de sus aguas, hacia delante o hacia atrás, seis veces cada hora...

Cysat señalaba, además, que el río que partía la ciudad en dos desapareció casi por completo varias veces. Incluso "se podía cruzar su lecho casi sin mojarse los pies, como hicieron los más jóvenes para conmemorar tan extraordinario suceso... Asimismo, los molinos [de agua] dejaron de funcionar". Cysat observó también que las "montañas y colinas subacuáticas, a las que se llegaba por barras de arena durante la bajada de las aguas, desaparecieron bajo las profundidades del lago. (...) Secciones de praderas se desplazaron una distancia considerable de sus posiciones originales y se abrieron profundas grietas en el suelo".

A tenor de este relato, cabía esperar que esos sucesos espectaculares hubieran dejado huellas en el fondo del lago. De hecho, a principios del decenio de 1980, miembros del Laboratorio de Limnogeología del Instituto Politécnico Federal de Zurich (ETH, de "Eidgenössische Technische Hochschule", en alemán) hallaron indicios que respaldaban nuestra hipótesis: en el fondo del lago, había dos grandes depósitos producidos por deslizamientos subacuáticos de fangos que parecían tener relación directa con el seísmo de 1601.

En 1996, al poco de hacerse cargo del Laboratorio de Limnogeología, la profesora McKenzie, coautora del artículo, prestó todo su apoyo al proyecto. Junto con otro de los firmantes (Anselmetti), descubrió numerosos depósitos de deslizamiento, muchos de ellos más profundos que los hasta entonces investigados. Siendo más antiguos, estos materiales debieron depositarse en tiempos prehistóricos. Por tanto, si pudiéramos distinguir los deslizamientos pro-





3. DETALLES ESTRUCTURALES de los sedimentos del lago de Lucerna, cartografiados mediante reflexión sísmica. Este método se sirve de las leyes acústicas. En un barco oceanográfico se instala un transductor que emite ondas sonoras hacia el agua. Estas se reflejan parcialmente en el fondo del lago y en las interfaces entre capas sedimentarias de distinta composición (*extremo izquierdo*). Cuando regresan a la superficie, el mismo transductor capta los débiles ecos, que se registran electrónicamente. La iteración de este proceso, a pequeños intervalos, y la transcripción de los resultados consecutivos (*izquierda*) reproducen la estructura de los sedimentos. Navegando unos 300 kilómetros en zigzag, los autores obtuvieron perfiles sísmicos que les permitieron cartografiar la parte occidental del lago (*arriba*).

vocados por terremotos de los corrimientos debidos a otros procesos, los depósitos arcaicos en cuestión aportarían testimonios de los últimos 15 milenios de historia sísmica de la zona.

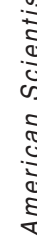
Por esa misma fecha Giardini, coautor también, andaba buscando un catálogo extenso de seísmos. En razón de su cargo (técnico en riesgos sísmicos potenciales de la Confederación Helvética), necesitaba saber dónde, cuándo y con qué frecuencia se habían producido grandes terremotos. Cuando Anselmetti publicó los descubrimientos del lago de Lucerna, Giardini se dio cuenta inmediatamente de que esos depósitos de deslizamiento constituían unos indicadores genuinos, ignorados hasta entonces, del pasado sísmico de Suiza. Así empezó lo que sigue siendo una estrecha colaboración entre el Servicio Sismológico suizo y el Laboratorio de Limnogeología del ETH. Para completar el equipo se necesitaba savia nueva. La trajo Schnellmann, un estudiante de doctorado y firmante también del artículo.

Cartografía mediante reflexión sísmica

En junio de 2001, Schnellmann y Anselmetti transportaron el *Tethys*, el barco oceanográfico del ETH, al lago de Lucerna. Comenzaron a explorar los sedimentos del fondo mediante reflexión sísmica. Este método remeda la ecografía aplicada en medicina: así como los radiólogos exploran el interior del organismo mediante ultrasonidos, los geólogos utilizan las señales acústicas para elaborar imágenes de la estructura interna de los sedimentos. En el casco del barco se instala un transductor acústico que, como un altavoz, emite ondas sonoras hacia el agua. Estas se reflejan parcialmente en el fondo del lago y en las separaciones entre capas sedimentarias de distinta composición. Cuando regresan a la superficie, el mismo transductor (que ahora opera como un micrófono) capta el eco. La señal acústica reflejada proporciona información acerca de la estructura de los sedimentos.

Navegando en zigzag, sondeamos una densa malla de líneas de exploración que, en total, sumaban más de 300 kilómetros de recorrido. Los resultados de la reflexión sísmica permitieron construir una imagen tridimensional de los sedimentos del lago. El análisis cuidadoso posterior de los datos en el laboratorio sacó a la luz indicios sólidos de movimientos de masas subacuáticas: marcas de fracturas en los taludes, debidas al desprendimiento de grandes masas de tierra, y depósitos de deslizamiento enterrados, que señalan dónde se posó el material despegado. Tales acumulaciones se reconocen fácilmente en los cortes sísmicos porque los sedimentos normales, no perturbados, del lago muestran una distribución horizontal en capas bien definidas; en cambio, los depósitos de deslizamiento, intensamente removidos, revelan una configuración caótica, semejante a la imagen "nevada" que ofrece la pantalla de un televisor sin sintonizar.

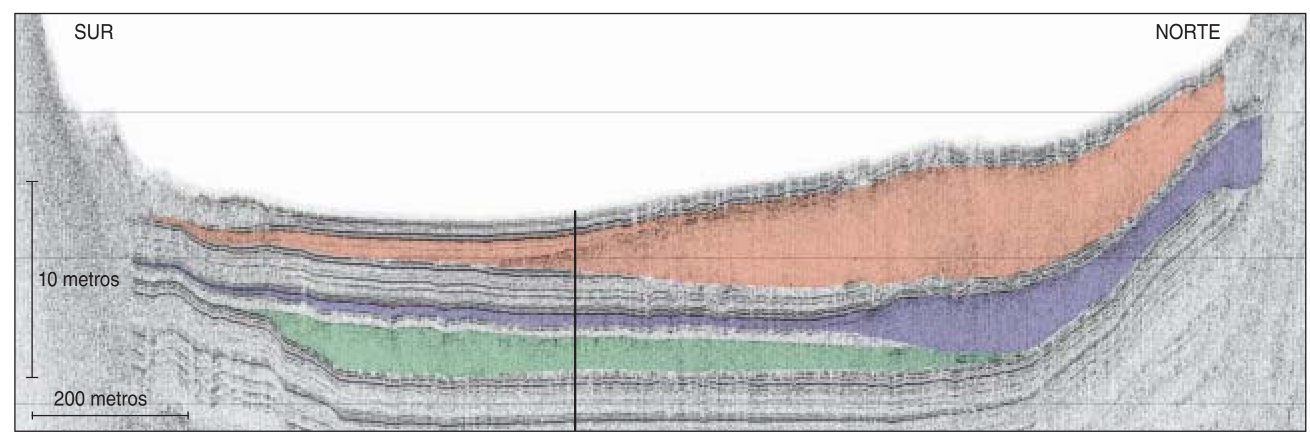
Tras docenas de cortes verticales separados por una corta distancia, pudimos seguir la pista de las capas prominentes y determinar así la extensión de cada uno de los desprendimientos a través de la sección del lago que habíamos inspeccionado. (El lago de Lucerna cuenta con varias cuencas independientes. Decidimos no examinar las adyacentes a deltas de ríos porque podían ser fuente de depósitos de desprendimientos sin relación alguna con los terremotos.) Muchos de los depósitos, advertimos, se hallaban exactamente en el mismo nivel que los detectados, y asociados al terremoto de 1601, por el anterior grupo de investigación del ETH. De hecho,

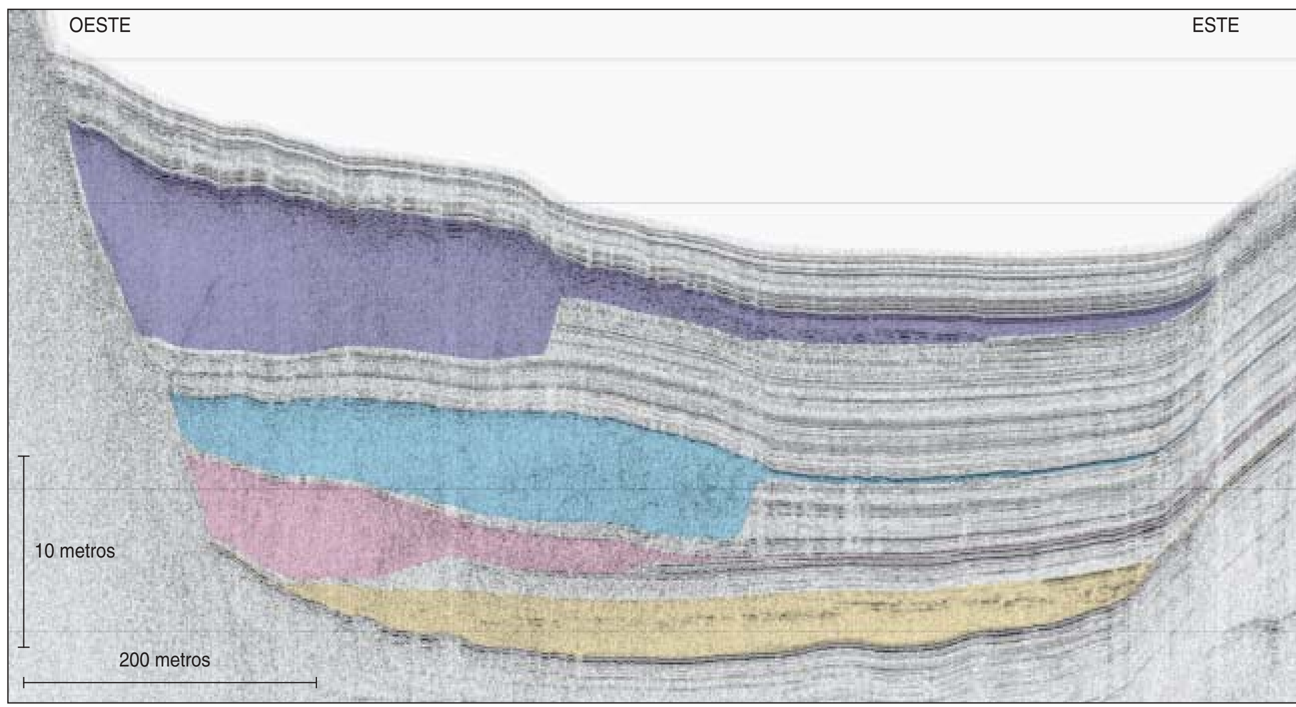


el horizonte (nivel estratigráfico) correspondiente a este suceso contiene al menos 13 hundimientos, lo que indica que el terremoto desencadenó resbalamientos sincrónicos en todo el lago. Es más, hallamos que, en el centro de dos subcuencas bien separadas, estos depósitos de deslizamiento aparecían recubiertos por capas de fango homogéneo de hasta dos metros de espesor: resultado, sin duda, de una gran cantidad de material removido que se mantuvo en suspensión durante un corto período de tiempo tras el seísmo, antes acabar sedimentándose.

¿Hubo algún otro terremoto anterior al de 1601? En busca de depósitos correspondientes a otros episodios sísmicos, examinamos con minuciosidad los cortes verticales. Descubrimos un horizonte, unos tres metros por debajo del fondo del lago, que contiene 16 desprendimientos. Sobre esos depósitos descansan masas espesas y homogéneas de fangos, en tres subcuencas diferentes. Ello nos indujo a sospechar que nos hallábamos ante los vestigios de seísmos violentos de un pasado remoto. ¿O tenían una explicación más trivial?

Una observación nos decantó hacia la hipótesis sísmica. Los restos de aquellos antiguos resbalamientos de fangos se encontraban no sólo al pie de los taludes que bordean las márgenes del lago, sino tam-

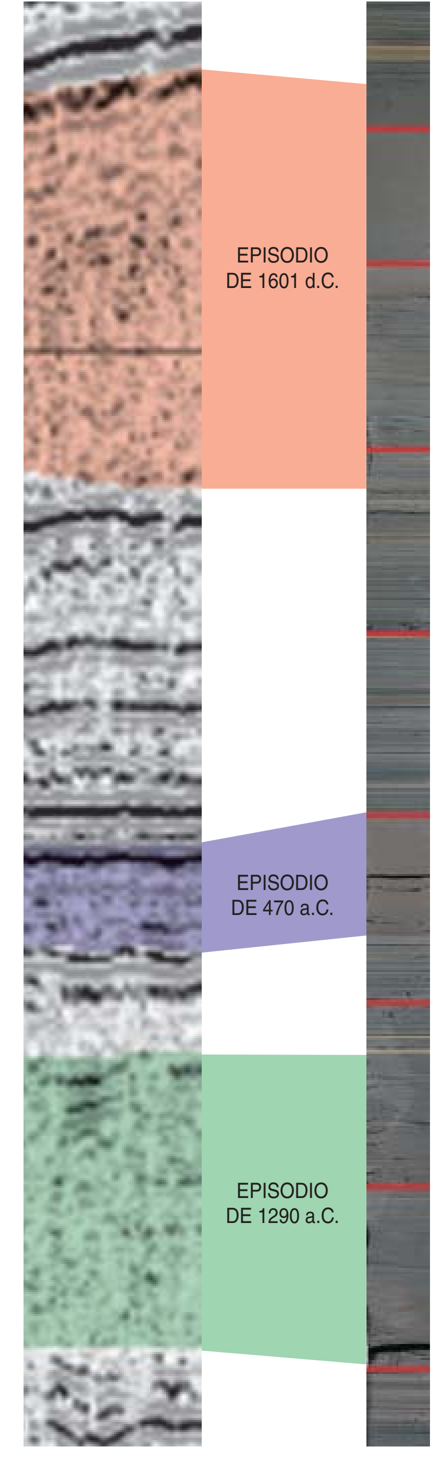




4. PERFILES DE REFLEXION SISMICA obtenidos en dos cruceros de rastreo. Revelan depósitos característicos de hundimientos a lo largo de la margen del lago (*zonas coloreadas*). La imagen superior muestra una sección norte-sur que corta por el centro una cuenca extensa y profunda (*línea roja a la derecha en el mapa de la figura 3*). La imagen inferior corresponde a una sección este-oeste próxima a la ribera occidental (*línea roja a la izquierda en el mapa de la figura 3*). Las zonas coloreadas presentan una configuración caótica, como la imagen "nevada" de la pantalla de un televisor sin sintonizar. Las otras capas sedimentarias, en cambio, muestran líneas continuas claras y oscuras. Estos y otros cortes sísmicos orientaron la posterior tarea de extracción de testigos sedimentarios. Se escogieron posiciones clave como el centro de la gran cuenca (*línea negra en la imagen superior*), donde la sonda, de aproximadamente 10 metros de largo, penetró en tres depósitos inducidos por hundimiento de diferentes edades (*rosado, púrpura, verde*).

American Scientist

5. EL ANALISIS DE LOS TESTIGOS SEDIMENTARIOS permitió a los autores confirmar su interpretación de las secciones sísmicas y obtener material orgánico apropiado para la datación. La imagen corresponde a la extracción indicada en la figura anterior (*derecha*, colocada en su posición estratigráfica correcta y ampliada horizontalmente para mayor claridad). Muestra una buena correspondencia con el perfil sísmico de este punto (*izquierda*). La capa rosada corresponde a un depósito de hundimiento acumulado en 1601, durante y poco después de un terremoto histórico. La capa púrpura muestra un depósito de deslizamiento más delgado, formado en 470 a.C. según la datación por radiocarbono. La capa verde representa un episodio anterior, aunque probablemente no se trató de un terremoto, pues causó un solo depósito de hundimiento.



bién en la vecindad de dos colinas sumergidas; la cima de una se encuentra a unos 85 metros por debajo de la superficie del lago. Las olas inducidas por tempestades o inundaciones generalizadas también podrían haber desencadenado deslizamientos alrededor del margen del lago, pero no habrían afectado la estabilidad de las pendientes del fondo, alejadas de la costa y a una profundidad de 85 metros. No cabía duda: se trataban de las huellas de un antiguo terremoto.

Testigos y datación

La inspección de los sismogramas reveló la existencia de otros tres temblores prehistóricos. Fueron lo bastante intensos para producir deslizamientos múltiples, pero todavía nos hallamos lejos de precisar su magnitud. Ni siquiera podemos fiarnos de lo que a primera vista parece una hipótesis razonable; a saber, cuanto mayor sea el terremoto, tanto más sedimento remueve. El mayor depósito de deslizamiento identificado (de unos 17 millones de metros cúbicos de fango), por ejemplo, no se debió a un episodio de gran violencia sino a un débil terremoto, o quizás a un proceso completamente diferente. Así lo creemos porque este enorme desprendimiento responde a un suceso aislado; en aquella época no se produjeron otras rupturas de taludes en el lago.

Pese a no poder cuantificar la magnitud de esos terremotos, creemos que deben de haber sido bastante intensos. Después de todo, esta parte de Suiza ha experimentado muchos pequeños seísmos a lo largo del siglo pasado (cinco episodios alcanzaron una magnitud 5 o superior) y ninguno de ellos ha producido fracturas múltiples de taludes en nuestra zona de estudio.

¿Cuándo tuvieron lugar esos terremotos? Para datar esos sucesos, necesitábamos testigos de sedimentos de los distintos depósitos de deslizamiento, que descansan a gran profundidad bajo el fondo del lago. (El suelo del lago se halla a 150 metros de profundidad.) Así pues, volvimos al lago con un pequeño pontón y una sonda de Kullenberg (o de pistón): un aparato de muestreo que consta en nuestro caso de un tubo de acero de 12 metros de largo con un peso de plomo de 300 kilogramos encima. Para tomar muestras de sedimentos, la sonda desciende lentamente a través de la columna de agua, asistida por un cable de acero unido a un potente torno. A 10 metros del fondo del lago, un mecanismo libera el tubo, que cae libremente el resto de la distancia. El tubo penetra en los sedimentos y se llena de fango. En su extremo inferior, un resorte impide que el testigo muestra se pierda en el camino de vuelta a la superficie.

Guiados por los cortes verticales sísmicos, extrajimos muestras de sedimentos de varios depósitos de deslizamiento, así como de sedimentos no perturbados. En total: ocho testigos, cada uno de 8 a 10 metros de longitud, de dos subcuencas diferentes. Se trataban de depósitos de deslizamiento tortuosamente doblados con lechos superpuestos de fango homogéneo. Estos empaquetamientos se diferenciaban claramente de las delgadas capas horizontales encontradas en otras partes del sedimento.

Para hallar la edad de cada depósito de deslizamiento, extrajimos hojas y pequeños trozos de madera del sedimento no perturbado suprayacente. La antigüedad del material orgánico se determinó mediante datación por radiocarbono. En los sedimentos también se hallaron dos capas horizontales de cenizas que se asociaron a erupciones volcánicas prehistóricas en el este de Francia y el oeste de Alemania. Combinando todas las fechas, las del material orgánico y las de las cenizas volcánicas, calculamos las edades de los depósitos de deslizamiento y las de los cuatro terremotos que los originaron: se produjeron, aproximadamente, en 470 a.C., 7820 a.C., 11.960 a.C. y 12.610 a.C. Así logramos reconstruir una cronología de los sucesos sísmicos prehistóricos de la Suiza central.

American Scientist



6. EN 1687, una ola de 4 metros de altura sacudió esta casa construida a la orilla del lago de Lucerna. Abatió las ventanas del primer piso e inundó el interior, volcando una mesa y derribando al propietario. La ola imponente causó estragos en un pueblo cercano y en ensenadas. El cielo estaba despejado y reinaba la calma. No se formó por causas meteorológicas, sino como resultado del hundimiento espontáneo de sedimentos en la orilla opuesta, donde una fracción importante del delta de un río desapareció de repente. Este ejemplo histórico muestra que los hundimientos de sedimentos y sus olas asociadas no provienen necesariamente del temblor del suelo. De aquí que los autores se concentraran en una parte del lago alejada de los grandes deltas. Atribuyeron a terremotos sólo aquellos sucesos que simultáneamente dejaron múltiples depósitos de deslizamiento en sus estelas.

Tsunamis lacustres

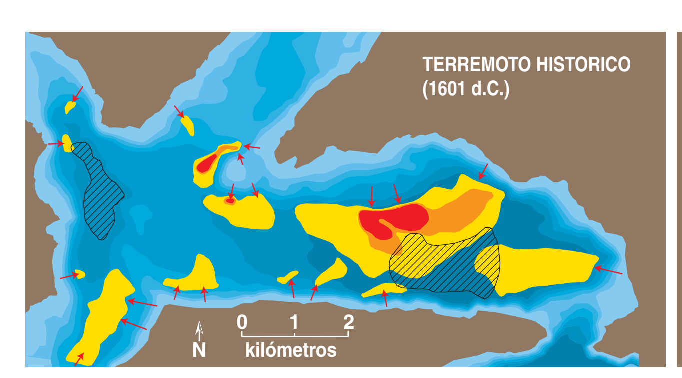
Quedaba aún por responder una de las preguntas formuladas por Cysat: ¿A qué respondía la agitación relatada de las aguas del lago? Los deslizamientos subacuáticos de fangos del tamaño que observamos, ¿pueden acaso desplazar suficiente agua como para generar olas de 4 metros de altura? Dichas olas, que se podrían considerar una especie de tsunamis, ¿encierran un grave peligro para los pueblos ribereños?

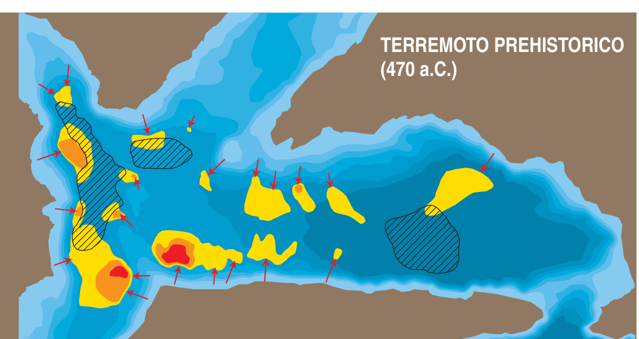
Para estimar la forma y amplitud de las olas generadas por el terremoto, Schnellmann y Anselmetti acudieron a un experto en simulación teórica de tsunamis (Ward). Estas olas arrasadoras, que suelen originarse en grandes movimientos de sedimentos en el fondo marino, han sido objeto de estudio por los geólogos marinos desde hace tiempo. Pero el comportamiento de tales masas de agua en lagos apenas si se ha abordado.

Para comprender mejor la relación entre los temblores de tierra en el lago de Lucerna y la generación de olas gigantes, modelamos los efectos del deslizamiento subacuático del episodio de 470 a.C. Lo seleccionamos porque disponíamos de información cartográfica suficiente para reconstruirlo con cierto detalle: conocíamos uno de los lugares donde el fondo se había arrancado, la trayectoria de los sedimentos y la geometría del depósito resultante. Los datos de reflexión sísmica mostraron que el material se desprendió de la orilla del lago, dejó una mella de nueve metros y transportó 100 metros cúbicos de sedimentos, parte de los cuales se deslizaron lateralmente hasta 1500 metros.

La simulación teórica mostró olas de más de tres metros de altura azotando la orilla opuesta al punto de fractura un minuto después del comienzo del deslizamiento. Su longitud de onda superaba el kilómetro, lo que es enteramente diferente de las olas superficiales ordinarias inducidas por el viento. En este sentido, las olas simuladas se elevaban como montañas de agua en el centro de la subcuenca, exactamente como lo describieron los testigos presenciales del episodio de 1601. Los movimientos de tierra combinados con los tsunamis resultantes debieron configurar una escena realmente atemorizadora.

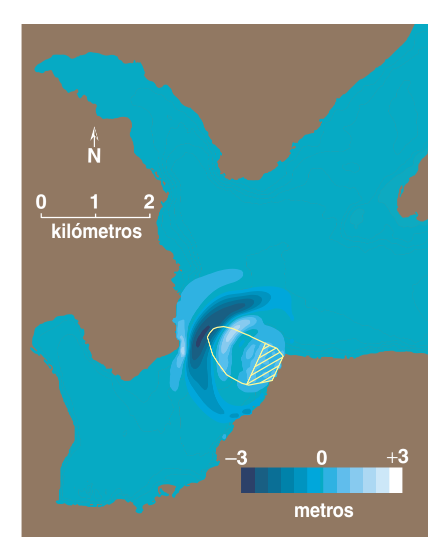
En su informe de 1601, Cysat indicaba que la salida normal del lago experimentó inversiones, moviéndose hacia atrás y hacia delante seis veces en una hora. El período del movimiento del agua era, pues, de unos 10 minutos; unas diez veces mayor que el de los tsunamis generados en el modelo teórico.

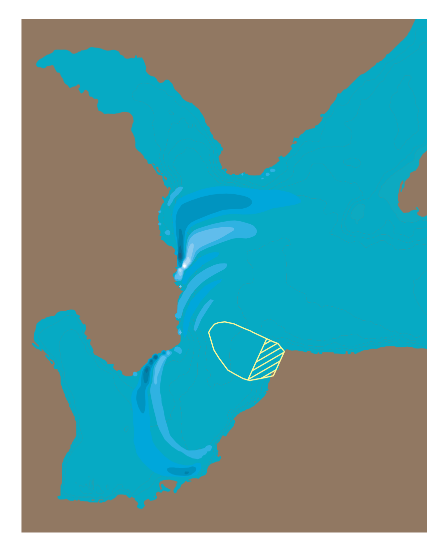




7. EL TERREMOTO DE 1601 (*izquierda*) generó varios depósitos de deslizamiento, cuyo espesor osciló entre menos de 5 (*amarillo*) y más de 10 metros (*rojo*). (Los de espesor intermedio —más de 5 y menos de 10 metros— aparecen en *naranja*.) En las partes más profundas del lago, esos depósitos están cubiertos por una capa espesa y homogénea de fango (*rayado*), resultado de todo el material removido que temporalmente se mantuvo en suspensión. Un conjunto de depósitos similar, aunque más antiguo (*derecha*), indica que un terremoto prehistórico debió desencadenar hundimientos en varios puntos del lago (*flechas*). No se atribuyen a inundaciones y otros posibles desencadenantes porque sólo un seísmo podía haber arrancado las laderas de colinas sumergidas, como ocurrió en este caso.









8. LA SIMULACION TEORICA pone de manifiesto que basta una fractura en la margen del lago (*área rayada*), con el consiguiente depósito de deslizamiento (*contorno amarillo*), para desencadenar una perturbación de la superficie semejante a un tsunami. El depósito de la figura corresponde a uno de los causados por el terremoto de 470 a.C. A diferencia de las olas normales, levantadas por el viento, las ondulaciones desatadas por temblores de tierra tienen una longitud de onda muy larga, de casi un kilómetro. El tamaño también es enorme: un minuto después de que la orilla del lago se hunda en la simulación, la altura de la ola (de cresta a seno) alcanza casi los seis metros (*izquierda*). La perturbación se propaga rápidamente, a la misma velocidad que el tráfico en una autopista. Se aleja de la zona de ruptura y se adentra dos kilómetros en dos de los brazos del lago durante el minuto siguiente (*centro*). Tres minutos después del inicio del simulacro, la perturbación queda, en gran parte, confinada al brazo noroeste (*derecha*). En realidad, las múltiples fallas en diferentes puntos de la orilla del lago generaron varias olas de este tipo. Al interferir unas con otras, crearon un patrón de interferencia complejo.

Probablemente, las oscilaciones empezaron con una frecuencia más elevada (frecuencia y período son inversamente proporcionales), pero la interferencia entre las olas que avanzaban hacia delante y las que regresaban hacia atrás terminó por disminuirla. El período del movimiento resonante de una gran masa de agua ("seiche") depende de la geometría de la cuenca. El viento y las variaciones de presión atmosférica causan oscilaciones similares, aunque de menor amplitud. Tales ondas estacionarias inducidas meteorológicamente se estudiaron en el lago de Lucerna por primera vez a finales del siglo XIX. Revelaron cambios de sentido cada 10 minutos, además de otros dos períodos de oscilación más largos. Por tanto, resulta razonable que el período de los movimientos inducidos por los terremotos muestre también esos valores.

Así pues, los sedimentos del lago de Lucerna permitieron comprender el suceso de 1601 y otros anteriores, como si de sismógrafos prehistóricos se tratara. Nuestro actual reto consiste en estimar el epicentro y la magnitud de dichos terremotos. Un proyecto ambicioso. Pero no bastan los datos que ofrece un lago. Se requiere una red de paleosismógrafos que operen en varios de forma independiente. En colaboración con el Servicio Sismológico suizo, el grupo de limnogeología del ETH centra ahora sus esfuerzos en cuatro lagos menores próximos al de Lucerna, en busca de huellas de terremotos históricos y prehistóricos que permitan estimar epicentros y magnitudes.

Los autores

Michael Schnellmann está terminando el doctorado en geología en el Instituto Politécnico de Zurich (ETH), donde **Flavio S. Anselmetti**, su tutor, dirige el Laboratorio de Limnogeología. **Domenico Giardini** imparte clases de sismología y geodinámica en el ETH y es el responsable del Servicio Sismológico suizo. **Judith A. McKenzie** ha investigado la sedimentación química y bioquímica en lagos modernos y en océanos. Enseña estratigrafía en el ETH. **Steven N. Ward** pertenece al cuerpo docente e investigador de la Universidad de California en Santa Cruz. Se dedica a la simulación de procesos dinámicos terrestres: terremotos, tsunamis y deformaciones tectónicas.

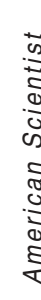
Bibliografía complementaria

SEICHES. B. J. Korgen en *American Scientist*, vol. 83, págs. 330-342; 1995.

LANDSLIDE TSUNAMI. S. N. Ward en *Journal of Geophysical Research*, vol. 106; págs. 11.201-11.216; 2001.

PREHISTORIC EARTHQUAKE HISTORY REVEALED BY LACUSTRINE SLUMP DEPOSITS. M. Schnellmann, F. S. Anselmetti, D. Giardini, J. A. McKenzie y N. S. Ward en *Geology*, vol. 30, págs. 1131-1134; 2002.

SUBOCEANIC LANDSLIDES. S. N. Ward y S. Day en *2002 Yearbook of Science and Technology*. McGraw-Hill; Nueva York, 2002.



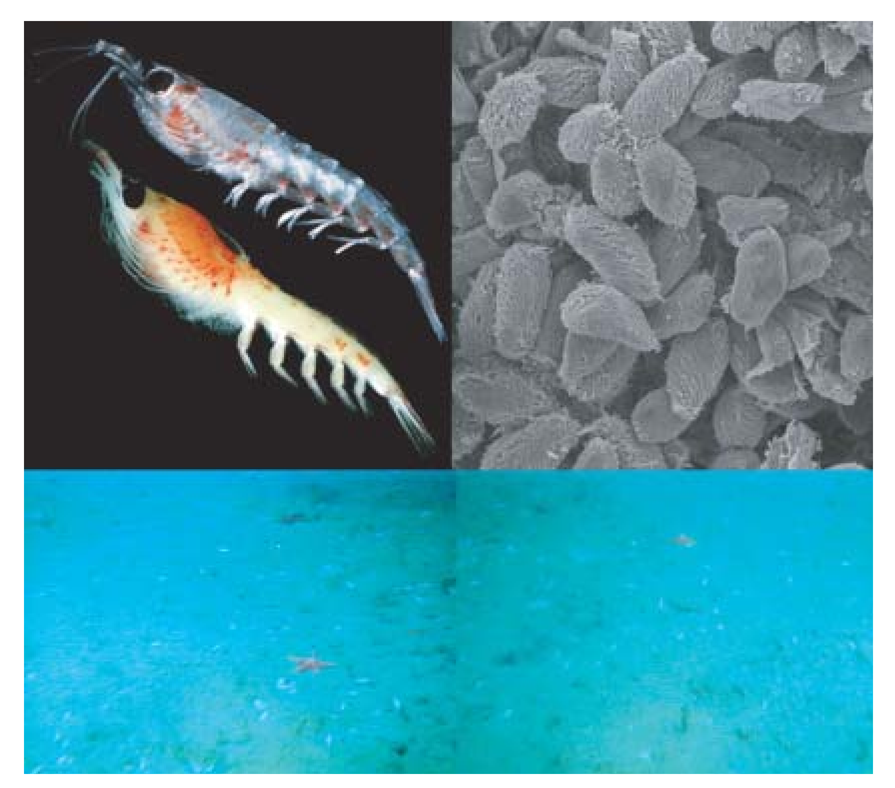
Parasitoides unicelulares

Una epidemia que mata el krill en el noroeste del océano Pacífico

A diferencia de los parásitos, los parasitoides matan a su huésped para proseguir su ciclo biológico. En la mayoría de los casos, sus víctimas son insectos y pequeños crustáceos.

La relación entre el parasitoide y su huésped requiere que el segundo desarrolle una estrategia reproductora de ciclo corto y engendre una extensa progenie, sometida a una elevada mortalidad larvaria; el parasitoide exige también del huésped que se reproduzca a una edad temprana. En otras palabras, la relación en cuestión resulta ineficaz si la estrategia reproductora del huésped se basa en ciclos biológicos largos, invierte menos biomasa corporal en tejido reproductor y procrea una descendencia exigua, aun cuando ésta tenga mayores probabilidades de supervivencia. Desde su descubrimiento, los parasitoides han despertado el interés de los científicos por la complejidad de sus adaptaciones, muy especializadas, que les han permitido persistir en su forma parasitaria.

Unos de los primeros parasitoides conocidos fueron las avispas que infectan arácnidos. La avispa *Hymenoepimecis* spp., por ejemplo, obliga a la araña *Plesiometa argyra* a convertirse en refugio para sus huevos. Primero hace de ella su huésped, luego su esclava y, por fin, su alimento.



Dos eufáusidos krill (*Thysanoessa spinifera*), arriba a la izquierda. El espécimen semitransparente corresponde a un individuo sano. El anaranjado ha sido infectado por el ciliado *Collinia spp.* Arriba a la derecha, una fotografía de microscopía electrónica de barrido muestra ciliados aglomerados dentro del caparazón del huésped. Abajo, una panorámica de la mortalidad masiva de krill causada por ciliados parasitoides.

CORTESIA DE PHILLIP COLLA (*arriba a la izquierda*); JAIME GOMEZ GUTIERREZ (*arriba a la derecha*); RICHARD D. BRODEUR (*abajo*)

Menos conocidos son los parasitoides del *krill*. Bajo el nombre de *krill* se agrupan los crustáceos eufáusidos (del orden Euphausiacea) que constituyen buena parte de la biomasa planctónica y micronectónica de los ecosistemas marinos. El *krill* infectado presenta una natación errática. Su caparazón semitransparente se torna anaranjado y, durante los últimos estadios de infección, se hincha de una manera desmesurada. En su interior, los parasitoides ciliados se desarrollan con rapidez: el *krill* queda aniquilado entre 40 y 70 horas después de su infección.

De las aproximadamente veinte especies de *krill* que se distribuyen en el norte de la corriente de California (Oregón) al menos tres (*Euphausia pacifica*, *Thysanoessa spinifera* y *Thysanoessa gregaria*) sufren la infección de un ciliado unicelular del género *Collinia* (del orden Apostomatida). Dos de éstas, *E. pacifica* y *T. spinifera*, se congregan en grandes enjambres que constituyen cerca del 95 % de la biomasa de *krill* de la región. Durante varios cruceros oceanográficos realizados entre 2000 y 2003 a lo largo de la costa de Oregón, recolectamos *krill* infectado por *Collinia* en el 7 % de las 313 localidades muestreadas cerca del talud continental, donde el *krill* presenta altas densidades poblacionales.

Los ciliados *Collinia* se descubrieron a mediados del siglo XX en varios crustáceos marinos, decápodos, anfípodos y copépodos. En un principio, sus infecciones se consideraron esporádicas y con escaso impacto en las poblaciones de sus huéspedes. En los años sesenta, sin embargo, se demostró que tales parasitoides incidían de forma significativa en la densidad demográfica de los crustáceos infectados.

Cuando *Collinia* entra en el cuerpo del *krill*, los signos de infección aparecen antes de 24 horas. Los ciliados atraviesan una serie de estadios polimórficos de infección, desarrollo, reproducción y enquistamiento, que definen su ciclo biológico. El

estadio alimentario (trofonte) consume todos los órganos, incluida la gónada, rica en lípidos. El reproductor (tomonte) se divide rápidamente para formar células de transmisión (tomite), rompe el cuerpo del *krill* entre la parte posterior del caparazón y el abdomen y mata al huésped. Por fin, miles de ciliados en el estadio de transmisión escapan del crustáceo y nadan en busca de una nueva víctima en la agregación de *krill*.

El comportamiento gregario del *krill* confiere ciertas ventajas a sus componentes, mayor eficiencia para capturar presas, huida ante depredadores y aumento de la posibilidad de reproducción. Sin embargo, también favorece el parasitismo, pues la infección puede propagarse fácilmente en las agregaciones con altas densidades de eufáusidos. En cualquier caso, los beneficios de este comportamiento superan las desventajas. De no ser así, el *krill* no formaría las colosales agregaciones que se observan en el océano.

La infección del *krill* en agregaciones con alta densidad de población puede alcanzar proporciones epidémicas. En junio de 2001, observamos uno de esos episodios de mortandad en el fondo del cañón submarino de Astoria (Oregón). A lo largo de un transecto de casi 1,5 km de longitud, encontramos grandes cantidades de cadáveres de *krill* o *krill* moribundo (hasta 300 individuos por metro cuadrado) sobre el fondo marino (entre 220 y 550 m de profundidad). A mediados de los ochenta, se descubrió que *Thysanoessa inermis*, una especie de *krill* que se distribuye en el mar de Bering, sufría la infección de *Collinia beringensis*, otro ciliado apostomátido. Las tasas de infección oscilaban entre el 68 y el 98 % en algunas zonas. De acuerdo con nuestras investigaciones, el endoparasitismo de *Collinia* spp. se encuentra ampliamente extendido en las poblaciones de *krill* de la corriente de California. La mortandad del cañón de Astoria quizá no constituya un episodio aislado.

Los parásitos y patógenos condicionan de forma importante la dinámica poblacional de las especies que habitan en ambientes marinos. Su efecto puede considerarse análogo a la depredación. En el caso del *krill*, los ciliados parasitoides "compiten" con otros depredadores: la ballena azul, aves marinas y salmones. Durante mucho tiempo, la mortandad del *krill* se había venido atribuyendo a la actividad de depredadores y a la falta de alimento. La epidemia observada en el cañón submarino de Astoria sugiere que el parasitismo también desempeña un papel significativo en la mortalidad del *krill*. El *krill* de la corriente de California resulta básico para la cadena trófica de este ecosistema. Constituye el alimento principal de salmones, sardinas y merluza. Por tanto, igual que la de los depredadores, la acción de los ciliados parasitoides puede afectar a los niveles tróficos superiores y a la industria pesquera de la región.

Jaime Gómez Gutiérrez
Centro Interdisciplinario
de Ciencias Marinas
La Paz, Baja California
México

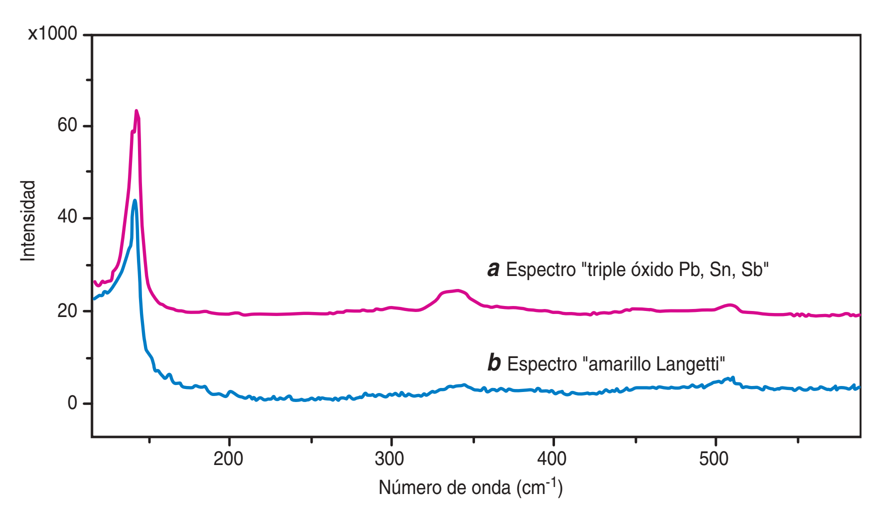
Pigmentos del barroco

Identificación molecular con espectroscopía Raman

Más de una veintena de los elementos de la tabla periódica aparecen directamente en la composición química de los principales pigmentos empleados por los antiguos artistas en la ejecución de sus obras de arte. Desde el sodio (Na), integrante del antiguo azul de lapislázuli, hasta el mercurio (Hg), que forma parte de la molécula del rojo bermellón, o desde el peligroso arsénico (As), constitutivo del oropimente o del rejalgar, hasta el cobalto (Co) en el esmalte azul, el pintor ha dispuesto de materiales metálicos y no metálicos que forman una auténtica "tabla periódica de los pigmentos". La mayor parte de los pigmentos usados a lo largo de la historia se conoce con precisión desde hace siglos, esto es, existen recetas de fabricación bien documentadas y se sabe su formulación química, gracias sobre todo a las aportaciones científicas del siglo XX. Sin embargo, ya sea por su parecida estructura química, ya sea por su confusa terminología histórica, sigue siendo hoy en día muy difícil discernir con las metodologías ordinarias entre ciertos pigmentos amarillos (compuestos de plomo y otros metales). Encontramos importantes ejemplos en pigmentos tan conocidos en pintura de caballete como el amarillo de Nápoles (en teoría, antimoniato de plomo), el massicot (monóxido de plomo ortorrómbico), el litargirio (monóxido de plomo tetragonal) y los dos amarillos de plomo-estaño (estannatos de plomo, tipos I y II). Entre otros aspectos curiosos, es destacable el parecido número atómico que tienen el antimonio (Z = 51) y el estaño (Z = 50). De ello se desprende lo difícil que puede resultar la diferenciación entre el antimoniato y el estannato de plomo cuando son analizados, por ejemplo, con fluorescencia de rayos X. La dificultad radica en las posiciones muy cercanas de las líneas espectrales (energías de transición electrónica) del antimonio y del estaño. Algo parecido se podría dar si se realizasen los análisis con un microscopio electrónico de barrido y difracción de rayos X (SEM/EDX).

De todo lo expuesto, resulta evidente que es necesario un gran rigor científico para determinar la composición química de cierto tipo de pigmentos amarillos a los que, hasta hace muy pocos años, se ha confundido entre sí, o cuya composición, simplemente, se ha identificado de manera errónea.

Imaginemos ahora que hubiera existido un pigmento que resultase de un proceso de fabricación basado en una combinación adecuada de óxido de plomo, dióxido de estaño y trióxido de antimonio. Bajo condiciones adecuadas de estequiometría y de temperatura, el producto final podría corresponder a un interesante caso particular de una estructura piroclórica cuya formulación general fue investigada en 1986, aunque no en el contexto del mundo pictórico, por Concepción



1. Espectros comparados: *a*, amarillo patrón (ternario), *b*, amarillo en la obra de Langetti. (El número de onda es el inverso de la longitud de onda.)

Cascales, J. A. Alonso e I. Rasines. En tal caso, la fórmula de este hipotético pigmento resultaría ser $Pb_2(SnSb)O_{6,5}$ y concordaría con los datos analíticos obtenidos en 1998 por Ashok Roy y Barbara H. Berrie en distintos óleos italianos del siglo XVII (de Nicolas Poussin, Pietro da Cortona y otros). Roy y Berrie realizaron un análisis elemental y cristalográfico con difracción de rayos X de la pigmentación amarilla de varias obras y establecieron que se trataba de un triple óxido de plomo, estaño y antimonio. También en 1998, Elisabeth Ravaud, Jean-Paul Rioux y Stéphane Loire publicaron los resultados, obtenidos con SEM/EDX, del análisis de la pigmentación amarilla de una obra de Pietro da Cortona; su conclusión fue que se trataba de "un pigmento amarillo poco conocido" constituido por plomo, estaño y antimonio.



2. "Lot y sus hijas", del pintor genovés G. B. Langetti.

Al mismo tiempo, en el laboratorio de espectroscopía Raman de la Universidad Politécnica de Cataluña nos ocurría que, al analizar la composición pictórica de obras del barroco italiano (de Luca Giordano y Giovanni Battista Langetti, Museo Frederic Marès de Barcelona), los espectros Raman resultantes —es decir, los de luz dispersada por el objeto que se estudia— no coincidían, cuando se trataba de la pigmentación amarilla, con ninguno de los espectros de nuestra base de datos de los pigmentos conocidos, catalogados o no. Teniendo en cuenta los análisis atómicos citados y la fórmula piroclórica propuesta, se encargó un patrón de referencia de ese triple óxido de plomo, estaño y antimonio a Enrique Parra, profesor de la Universidad Alfonso X el Sabio de Madrid, quien fabricó no sólo el pigmento en estado puro (ternario, o compuesto por esos tres elementos), sino también otra versión del mismo, que lo incorporaba en una matriz de plomo y sílice (lo convertía en un compuesto cuaternario). De ambos patrones medimos sus espectros Raman y descubrimos que coincidían (a veces el uno, a veces el otro) con los espectros anteriormente obtenidos en los cuadros de Giordano y Langetti, así como en algunos de autoría anónima y procedencia privada. Carmen Sandalinas, conservadora del Museo Frederic Marès, realizó en nuestro departamento su tesis doctoral sobre estos compuestos amarillos derivados del plomo y otros metales. En su trabajo se demuestra, tanto analítica como históricamente, la conexión existente entre la antigua fabricación de estos compuestos y la industria del vidrio veneciano en la Italia de los siglos XVI y XVII.

En definitiva, se llega, a partir de la información molecular proporcionada por la espectroscopía Raman (sin perturbar el objeto analizado) y de la coincidencia completa de los resultados con los obtenidos con otras técnicas analíticas atómicas, a la conclusión lógica de que este compuesto (triple óxido de plomo, estaño y antimonio) fue un pigmento ampliamente utilizado por los pintores del barroco italiano aunque, hoy por hoy, no esté todavía catalogado. Como ejemplo experimental presentamos la comparación de los espectros Raman correspondientes al pigmento ternario (óxido triple de Pb, Sn y Sb) y al identificado en la obra "Lot y sus hijas", pintada hacia 1666, del artista genovés G. B. Langetti (*véase la figura 1*). La coincidencia espectral resulta evidente. Los resultados se obtuvieron con un sistema Raman Induram Jobin Yvon de fibra óptica y un láser continuo de He-Ne (632,8 nm). Por otra parte, los resultados conseguidos por Montserrat Marsal, de la Universidad Politécnica de Cataluña, al analizar micromuestras con un SEM/EDX, confirmaron la composición química elemental de este extraño amarillo. Además del abajo firmante, son integrantes del grupo de espectroscopía láser Carmen Sandalinas, M.ª José Soneira, Rosanna Pérez-Pueyo, Amador Gabaldón, Mónica Breitman y Alejandro López-Gil, todos ellos investigadores del proyecto de la CICYT TIC 2000-1045 (ALIAGOA).

SERGIO RUIZ MORENO
Grupo de Espectroscopía Láser
Depto. de Teoría de la Señal
y Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cataluña

Saberes y poderes

La Sociedad Geográfica de Madrid y el colonialismo español en Marruecos

El siglo XIX es el período por excelencia de la expansión y consolidación del imperialismo europeo. En este contexto nacen las sociedades geográficas, entidades ciudadanas no académicas —pero sí eruditas y, en algunos casos, con cierta vocación científica— y no gubernamentales —aunque con fuertes lazos con el poder establecido—, impulsadas por la burguesía decimonónica y con una amplia variedad de intereses y de objetivos, muchos vinculados al proceso de expansión colonial.

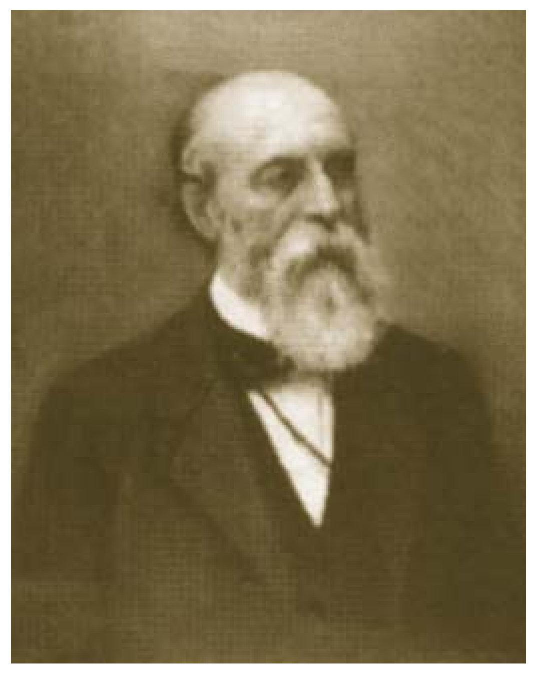
La Sociedad Geográfica de Madrid (SGM) se crea en 1876, en el período de máxima proliferación de estas corporaciones —la primera de ellas, la *Société de Géographie de Paris*, se fundó en 1821— y en un marco general científico-político donde la materialización y legitimación del imperialismo europeo corre a cargo de diversas ciencias de reciente constitución —la antropología o la etnología, por ejemplo— o revitalizadas y reestructuradas —la geografía y el derecho internacional—, así como de determinadas instituciones científico-benéfico-propagandísticas laicas o religiosas. Por otra parte, a nivel interno, su nacimiento se enmarca en el período de la Restauración canovista (1875), que permitirá la aparición de un clima favorable al desarrollo de iniciativas sociales diversas.

En enero de 1876, Francisco Coello, Eduardo Saavedra y Joaquín Maldonado Macanaz dirigieron una circular a las corporaciones oficiales y a numerosos particulares para constituir una sociedad geográfica que prestigiara a España a nivel internacional mediante la promoción del desarrollo y la difusión de la geografía, así como del estudio del territorio de España, de sus posesiones de Ultramar y de aquellos países con los que existieran relaciones importantes o que pareciera oportuno fomentar. Por estas últimas razones, puede afirmarse que la SGM desempeñaría una labor fundamental en la formulación de la política colonial española y en las campañas procolonialistas. En este sentido, su acción incluyó la defensa de los derechos históricos de España sobre determinados territorios y su ocupación; la potenciación de exploraciones y viajes; tentativas encaminadas a implicar y movilizar a distintos sectores económicos y de la sociedad civil —entre esas tentativas se encontraba el apoyo y la colaboración con asociaciones colonialistas—; propuestas concretas de colonización y de estudios geográficos a realizar en las posesiones españolas; organización de congresos, cursos y conferencias de carácter procolonial; esfuerzos por influir en la política gubernamental proponiendo actuaciones diversas, etc.

Sin embargo, hasta los años ochenta, y debido a una serie de factores —incremento de la actividad expansionista europea en Africa; exploraciones de Iradier y de Abargues de Sostén; celebración de la Conferencia de Madrid (1880) o ingreso en la sociedad de Joaquín Costa y otros regeneracionistas—, no pasarían las cuestiones coloniales a ocupar un lugar privilegiado en el seno de la corporación. El punto de inflexión lo marcó la organización del Congreso Español de Geografía Colonial y Mercantil (1883), con el que se intentó agitar al Gobierno, a la opinión pública, a diferentes sectores de la sociedad civil y a los grupos económicos para que promocionaran la actividad colonial española. Al inicial gusto por las exploraciones y prospecciones geográficas se aña-



Francisco Coello y Quesada (1822-1898)



Eduardo Saavedra Moragas (1829-1912)



Joaquín Maldonado Macanaz (1833-1901)



Mapa 1. «El Protectorado español en Marruecos. Zona norte» (repr. de ALTA COMISARÍA DE ESPAÑA EN MARRUECOS (ed.) (1948). *Acción de España en Marruecos. La obra material.* Tetuán.

dieron consideraciones de carácter político, geoestratégico, económico e incluso moral. La SGM trataba de romper el tradicional aislamiento internacional de España, haciéndola partícipe de la corriente expansionista que se había desatado en Europa.

A partir de 1898, a raíz de la pérdida de las colonias del Caribe y del Pacífico y de la creciente intervención extranjera en Marruecos, la SGM centró su mirada en este último territorio y propugnó una más decidida actuación del Gobierno y de la sociedad para defender los intereses coloniales españoles en el Imperio jerifiano. La aportación de la corporación, que no dejó de subrayar el pretendido valor estratégico de la geografía y su carácter auxiliar de la colonización, consistió en proponer y realizar diversos estudios, informes técnicos y exploraciones científicas que incrementasen el conocimiento del país y la influencia española.

Una vez implantado el Protectorado (1912), la Sociedad elaboró un programa planificado de estudio de los recursos naturales, comunicaciones, etnología, organización social, etc., que sirviera para establecer las bases de la acción de España en Marruecos. Sin embargo, la inestabilidad imperante en la zona y el estallido de la guerra del Rif impidieron llevar a cabo la mayor parte de las investigaciones propuestas. Por otra parte, la consolidación, a mediados de la década de los años veinte, de diferentes organismos mejor preparados para el análisis geográfico, más la asunción por la Administración de la acción colonial, provocaron que la SGM adquiriera un papel más bien divulgador y sintetizador del conocimiento sobre el Protectorado aportado desde otros ámbitos.

JOSÉ LUIS VILLANOVA
JOAN NOGUÉ
Cátedra de Geografía
y Pensamiento Territorial
Universidad de Gerona

Floración

Control termosensorial

Uno de los momentos críticos en la vida de las plantas es aquel en el que deciden iniciar su fase reproductora. El éxito de esta tarea depende de tres condiciones. En primer lugar, que la floración ocurra cuando la planta haya alcanzado cierta madurez y pueda, así, soportar el gasto energético de la reproducción; en segundo lugar, que las condiciones ambientales sean propicias para la supervivencia de las semillas que se formen y las plántulas que emerjan de ellas; por último, que la floración aparezca sincronizada entre los individuos de una misma especie y pueda tener lugar la fecundación.

Para determinar el momento preciso de la floración, las plantas han de integrar múltiples señales, ambientales y endógenas. Por una parte, cuentan, como el resto de los organismos superiores y algunos hongos, con un reloj circadiano que les permite averiguar si los días son largos (en verano) o cortos (en invierno). Por otra parte, las plantas emplean diversas hormonas para seguir el estado nutricional y de desarrollo en el que se encuentran, y, también, para asegurar la floración incluso en ausencia de condiciones inductoras.

Que la temperatura afecta a la floración se conoce desde hace tiempo. Numerosas especies que florecen en primavera, como *Arabidopsis thaliana*, requieren la exposición transitoria a temperaturas bajas,



1. En el Parque de Yellowstone, las plantas más próximas al agua termal florecen antes que los individuos de su misma especie que habitan más alejados de la fuente de calor.

cercanas a la congelación; de ese modo, reconocen que han superado el invierno. Este efecto se ejerce a través de la inactivación del gen *FLC*, que codifica un factor de transcripción cuya función consiste en reprimir la expresión de genes inductores de la floración desde el comienzo del ciclo biológico de la planta, para evitar una floración precoz. Según se cree, cuando llegan las bajas temperaturas cambia el estado de condensación de la cromatina en el gen *FLC*; se silencia este gen y se reduce la represión impuesta por FLC antes del invierno.

2. Las plantas integran las señales ambientales que regulan la floración a través de un puñado de genes. FT y SOC1 son determinantes para inducir la floración; lo mismo su patrón de expresión que su intensidad dependen de la luz, el reloj circadiano y la temperatura.

Curiosamente, la temperatura ambiente opera también en el sentido contrario. Acontece cuando el termómetro se sitúa entre los 12 y los 24 ºC. En este caso, las temperaturas más elevadas promueven una floración adelantada, mientras que las más bajas la retrasan.

Se venía atribuyendo ese fenómeno al enlentecimiento del metabolismo y del desarrollo de las plantas a bajas temperaturas. Sin embargo, en el Instituto de Biología Molecular y Celular de las Plantas de la Universidad Politécnica de Valencia, en colaboración con investigadores del Instituto Salk de San Diego, California, hemos descubierto un grupo de genes de *Arabidopsis* cuyo papel principal podría ser el de modular el tiempo de floración específicamente en respuesta a cambios en la temperatura.

La prueba principal reside en la inactivación de los genes *FCA*, *FVE* y *FPA*, que provoca que las plantas florezcan igual de tarde sea cual sea la temperatura ambiente. Es decir, estos genes son necesarios para que las plantas respondan a la elevación de la temperatura induciendo la floración.

Frente a lo que cabría imaginar, el control termosensorial de la floración a través de FCA, FVE y FPA, no parece estar mediado por FLC. Si fuera así, un mutante de *Arabidopsis* sin el represor floral FLC debería florecer rápidamente a cualquier temperatura; sin embargo, dicho mutante sigue percibiendo cambios en la temperatura ambiente y florece a bajas más tarde que a altas temperaturas.

¿Cómo se promueve entonces la floración cuando sube la temperatura? A buen seguro, mediante la drástica reducción en el nivel de expresión de ciertos genes (*FT* y *SOC1*), que aceleran la floración en respuesta al aumento del período de luz cuando se aproxima la primavera. Estos genes tienen un ritmo cíclico de expresión a lo largo del día, impuesto por el reloj circadiano a través de CO, con picos de expresión a ciertas horas; se sabe que su nivel de expresión es crítico para determinar el tiempo de floración. A bajas temperaturas, el patrón cíclico de expresión de estos genes apenas se altera, pero la intensidad de sus picos de expresión disminuye notablemente; ello indica que el efecto último de la temperatura estriba en modular el nivel de expresión de los genes que normalmente responden a señales de luz. De hecho, plantas que producen una cantidad muy elevada de FT a cualquier hora del día florecen muy pronto; las bajas temperaturas no compensan en absoluto este adelanto.

Este mecanismo de regulación termosensorial de la floración sugiere la idea de que el reconocimiento de las estaciones por parte de las plantas es multifactorial: éstas perciben que se acerca la primavera no sólo porque los días se alargan, sino también porque la temperatura ambiente aumenta progresivamente. Además, la interacción entre la luz y la temperatura permite asimismo una respuesta más flexible y efectiva a cambios en el entorno; si una primavera resulta muy fría, las plantas pueden ajustar ligeramente su momento de florecer para hacerlo en las condiciones ambientales idóneas.

Miguel Blázquez
Instituto de Biología Molecular
y Celular de las Plantas
Universidad Politécnica de Valencia

La Galaxia del Sombrero

Esta imagen de la Galaxia del Sombrero —Messier 104 o NGC 4594—, en la constelación de Virgo, es uno de los mayores mosaicos confeccionados hasta ahora con fotografías del telescopio espacial Hubble. Se trata de una superposición de tomas en las partes azul, visible y roja del espectro. Se efectuaron con la Cámara Avanzada de Sondeo (ACS), el gran instrumento del Hubble para la compilación de imágenes celestes. En total, se invirtieron en este mosaico 10,2 horas de tiempo de exposición; las sesiones se desarrollaron en mayo y junio de 2003.

La galaxia tiene un diámetro angular de unos 10 minutos de arco. A la distancia a que se encuentra, 28 millones de años luz (9 megaparsec), equivale a un diámetro lineal de 82.000 años luz. Se trata, pues, de una galaxia espiral de gran tamaño, comparable a nuestra Vía Láctea y a la Galaxia de Andrómeda, los miembros más grandes del Grupo Local. Observamos su plano ecuatorial sin ángulo; la vemos de canto. Se percibe así con claridad la perfecta definición de su disco ecuatorial, donde se concentran el gas y el polvo interestelares. Sólo dentro de ese disco se pueden formar hoy en día nuevas estrellas. El engrosamiento central las alberga viejas;



la formación de astros terminó allá hace miles de millones de años. Dicho abultamiento está más desarrollado, en comparación con los brazos de la espiral, que en nuestra galaxia o que en Andrómeda; por eso se clasifica a la Galaxia del Sombrero como de tipo SO o Sa.

La Galaxia del Sombrero pertenece al Cúmulo de Virgo, el cúmulo de galaxias más próximo a nuestro Grupo Local. Comprende unas 3000. Tenemos su centro a unos 50 millones de años luz, pero sólo una pequeña parte de sus miembros se concentra allí. La mayoría se reparte por una extensa región de 15º × 40º; las estribaciones se prolongan por el firmamento entero. Cabe suponer que el Grupo Local también pertenece al Cúmulo de Virgo.

Aparte de la gran Galaxia del Sombrero, la imagen muestra algunas estrellas interpuestas, de nuestro entorno galáctico, así como algunas de las galaxias, o pares de galaxias, o grupos, del Cúmulo de Virgo. La mayoría de los objetos que se ven son galaxias situadas a distancias cosmológicas; así sucede siempre en fotografías tan profundas y nítidas como ésta. (Imagen: NASA/STScI/Aura)

—Jakob Staude

La sinfonía cósmica

Las observaciones recientes de la radiación del fondo cósmico de microondas muestran que el universo primigenio resonaba armoniosamente

Wayne Hu y Martin White

Al principio fue la luz. Sometida a las intensas condiciones del universo temprano, la materia ionizada radiaba energía, que quedaba atrapada en su seno como la luz en la niebla espesa. Pero a medida que el universo se expandía y enfriaba, los electrones y protones se unieron para formar los átomos neutros, y la materia perdió su capacidad de apresar luz. Hoy, unos 14.000 millones de años más tarde, los fotones de aquel gran despliegue de radiación constituyen el fondo cósmico de microondas (FCM).

Cuando se sintoniza la televisión entre dos canales, alrededor del 1 por ciento de la estática que se observa en la pantalla se debe al FCM. Cuando se barre el cielo con instrumentos sensibles a estas microondas, la señal es casi idéntica en todas las direcciones. La omnipresencia y constancia del fondo cósmico indican que proviene de un pasado simple, antes incluso de que las estructuras celestes, los planetas, las estrellas y las galaxias existieran. Gracias a esa sencillez, cabe predecir las propiedades del FCM con una gran precisión. En los últimos años, se han comparado esas predicciones con las observaciones de los telescopios de microondas instalados a bordo de globos y satélites. Esta investigación nos permite acercarnos a la respuesta de algunas preguntas muy antiguas: ¿de qué está hecho el universo? ¿Qué edad tiene? ¿De dónde provienen los objetos que comprende?

Arno Penzias y Robert Wilson, de los laboratorios Bell de AT&T, descubrieron en 1965 la radiación del FCM cuando investigaban el origen de una fuente misteriosa de ruido de fondo con su radioantena astronómica. Este descubrimiento ratificó la teoría de la gran explosión, según la cual el universo fue en un principio un plasma denso y caliente de partículas dotadas de carga y fotones. La expansión del universo fue enfriando el fondo; hoy, está tan gélido como la radiación emitida de un cuerpo a 2,7 kelvin (es decir, a unos 270 grados centígrados bajo cero). Para cuando se emitió, el fondo cósmico debía de tener una temperatura de unos 3000 kelvin (o unos 2727 grados centígrados).

En 1990, el satélite COBE (Explorador del Fondo Cósmico) midió el espectro del FCM. Confirmó lo que se esperaba. Sin embargo, otro descubrimiento suyo eclipsó este gran logro: la detección de pequeñas variaciones —del orden de una parte en 100.000— en la temperatura del FCM de unas regiones a otras del cielo. Los observadores llevaban buscando esas variaciones durante más de dos décadas; en ellas se encuentra la clave del origen de las estructuras del universo: de cómo se convirtió el plasma en galaxias, estrellas y planetas.

Desde entonces, se han empleado instrumentos cada vez más refinados para sondear las variaciones de temperatura del FCM. La culminación de todos estos esfuerzos fue el lanzamiento en 2001 de la Sonda Wilkinson para la Anisotropía del Fondo de Microondas (WMAP), que orbita alrededor del Sol a un millón y medio de kilómetros de la Tierra. Sus resultados revelan que las variaciones de temperatura del fondo siguen una pauta concreta, predicha ya por la teoría cosmológica: las manchas calientes y frías de la radiación se distribuyen en tamaños característicos. Merced a estos datos se han podido determinar con precisión la edad, composición y geometría del universo. Ha venido a ser como si se averiguase de qué manera está construido un instrumento musical sólo con prestar atención a su sonido. Pero la melodía cósmica la ejecutan aquí unos músicos muy particulares y viene acompañada de extrañas coincidencias que piden una explicación.

Las ideas físicas que explican estas observaciones datan de finales de los años sesenta. P. James Peebles, de la Universidad de Princeton, y un doctorando, Jer Yu, calcularon que en el universo temprano se generaron ondas sonoras. (Casi al mismo tiempo, Yakov B. Zel'dovich y Rashid A. Sunyaev, del Instituto de Matemáticas Aplicadas de Moscú, llegaron a una conclusión similar.) Cuando la radiación todavía estaba atrapada por la materia, el sistema muy ligado de fo-



DAVID EMMITE

LAS ONDAS SONORAS del universo temprano —representadas aquí por los diapasones— nos revelan la edad, composición y geometría del cosmos.

tones, electrones y protones se comportaba como un solo gas. Los electrones dispersaban los fotones como proyectiles que rebotasen. Al igual que en el aire, una pequeña perturbación de la densidad del gas se propagaba en forma de onda sonora, una cadena de pequeñas compresiones y enrarecimientos. Las compresiones calentaban el gas y los enrarecimientos lo enfriaban: cualquier perturbación daba lugar a un patrón de fluctuaciones de temperaturas.

La acústica de los orígenes

Para cuando las distancias crecieron en el universo hasta una milésima de su tamaño actual —unos 380.000 años después de la gran explosión—, la temperatura del gas había disminuido hasta el punto en que los protones podían capturar ya electrones y formar así átomos. Esta transición, la "recombinación", cambió el panorama por completo. Los choques con las partículas cargadas no volvieron ya a dispersar fotones; por primera vez, éstos se propagaron sin ningún impedimento por el espacio. Los fotones liberados en las zonas más calientes y densas son más energéticos que los emitidos en regiones más diluidas; la estructura de manchas calientes y frías creada por las ondas acústicas se perpetuó en el FCM. Por otra parte, la materia se liberó de la presión de radiación, que impedía que se concentrase y creara grumos. Bajo la fuerza atractiva de la gravedad, las regiones más densas fueron convirtiéndose en estrellas y galaxias. Las variaciones de una parte en cien mil que se observan en el FCM tienen la amplitud precisa para dar lugar a las actuales estructuras a gran escala [*véase* "Los planos de la creación", por Michael A. Strauss, *en este mismo número*].

No obstante, ¿quién o qué fue el desencadenante, la fuente de las perturbaciones iniciales que originaron las ondas acústicas? Una cuestión difícil. Imagínese que asiste a la gran explosión y la posterior ex-

pansión. A cada momento, vería sólo una región finita del universo, que cubriría la distancia que la luz hubiese podido viajar desde la gran explosión. Se llama horizonte al borde de esta región, el límite más allá del cual no se puede ver. Esa región seguiría creciendo hasta alcanzar el tamaño del universo observable hoy día. Puesto que la información no se propaga más deprisa que la luz, el horizonte define la esfera de influencia en que opera cualquier mecanismo físico. A medida que retrocedemos en el tiempo buscando el origen de las estructuras de un determinado tamaño, el horizonte se va haciendo menor que las propias estructuras (*véase el recuadro* "La línea temporal del universo"). Por tanto, ningún proceso físico causal puede explicar el origen de éstas. En cosmología se llama a este dilema "problema del horizonte".

Afortunadamente, la teoría de la inflación lo resuelve; aporta además un mecanismo físico que genera las ondas sonoras primordiales y los precursores de toda estructura del universo. La teoría tiene como premisa la existencia de una nueva forma de energía, transportada por un campo, el "inflatón", que aceleró la expansión del universo en los primeros momentos tras la gran explosión. Como resultado, el universo observable hoy es sólo una fracción pequeña del universo observable antes de la inflación. Las fluctuaciones cuánticas del campo de inflación, amplificadas por una expansión rápida, originarían unas perturbaciones iniciales casi iguales para todas las escalas; es decir, las perturbaciones sobre regiones pequeñas tendrían la misma magnitud que las que afectasen a regiones mayores. Estas perturbaciones se convirtieron en fluctuaciones de la densidad de energía de un lugar a otro del plasma primordial.

En el detalle del patrón de ondas acústicas del FCM se han encontrado ahora pruebas que avalan la teoría de la inflación. Puesto que la inflación produjo, en el primer momento de la creación y al mismo tiempo, todas las perturbaciones de densidad, las fases de las ondas sonoras quedaron sincronizadas. Se estableció así un espectro acústico con armónicos muy parecido al de un instrumento musical. Sóplese por un tubo con los dos extremos abiertos. La frecuencia fundamental del sonido corresponde a una onda (o modo de vibración) tal, que el mayor desplazamiento del aire se da en los extremos del tubo y el menor, en el centro (*véase el recuadro* "Los armónicos cósmicos"). La longitud de onda del modo fundamental es el doble de la longitud del tubo. Pero el sonido también tiene una serie de armónicos. Sus longitudes de onda son fracciones enteras de la fundamental: la mitad, la tercera parte, la cuarta, y así sucesivamente. Dicho de otra forma, las frecuencias de los armónicos son dos, tres, cuatro o más veces la frecuencia fundamental. Los armónicos distinguen un stradivarius de un violín normal; enriquecen el sonido.

Las ondas acústicas del universo temprano se parecen a ésas, sólo que ahora debemos pensar en oscilaciones temporales; no espaciales. Siguiendo con la analogía, la longitud del tubo representa la duración finita en que las ondas del sonido viajaron a través del plasma primordial; empezó con la inflación y terminó con la recombinación, unos 380.000 años más tarde. Supongamos que una determinada región espacial tiene el mayor desplazamiento positivo —es decir, la máxima temperatura— durante la inflación. A medida que las ondas se propagan, la densidad de la región comenzará a oscilar, primero hacia temperaturas medias (desplazamiento mínimo) y luego hacia temperaturas mínimas (máximo desplazamiento negativo). La onda que hace que esa región alcance el máximo desplazamiento negativo justo en la recombinación es la onda fundamental del universo temprano. Las longitudes de onda de los armónicos son fracciones enteras de la longitud de onda fundamental. Al oscilar dos, tres o las veces que sea más deprisa que la onda fundamental, los armónicos imparten a regiones menores desplazamientos máximos, bien positivos, bien negativos, en el momento de la recombinación.

El espectro de potencia

¿Cómo se extrae del FCM esa pauta? Se dibuja la magnitud de las variaciones de temperatura en función del tamaño de las manchas calientes y frías en una gráfica llamada espectro de potencia (*véase el recuadro* "El espectro de potencia"). Los resultados muestran que las regiones con las mayores variaciones subtienden aproximadamente un grado en el cielo, más o menos el doble que la luna llena. (En la época de la recombinación, estas regiones debían de tener diámetros de un millón de años luz, pero tras expandirse el universo desde entonces mil veces, aparecen ahora estiradas hasta ocupar casi mil millones de años luz.)

El primer pico, y el más alto, del espectro de potencia corresponde a la onda fundamental, la que comprimió y diluyó regiones de plasma hasta sus máximos valores en el momento de la recombinación. Los picos siguientes del espectro de potencia representan las variaciones de temperatura debidas a los armónicos. La serie de picos confirma que la inflación generó todas las ondas acústicas a la misma vez. Si las perturbaciones hubieran acontecido con el transcurso del tiempo,

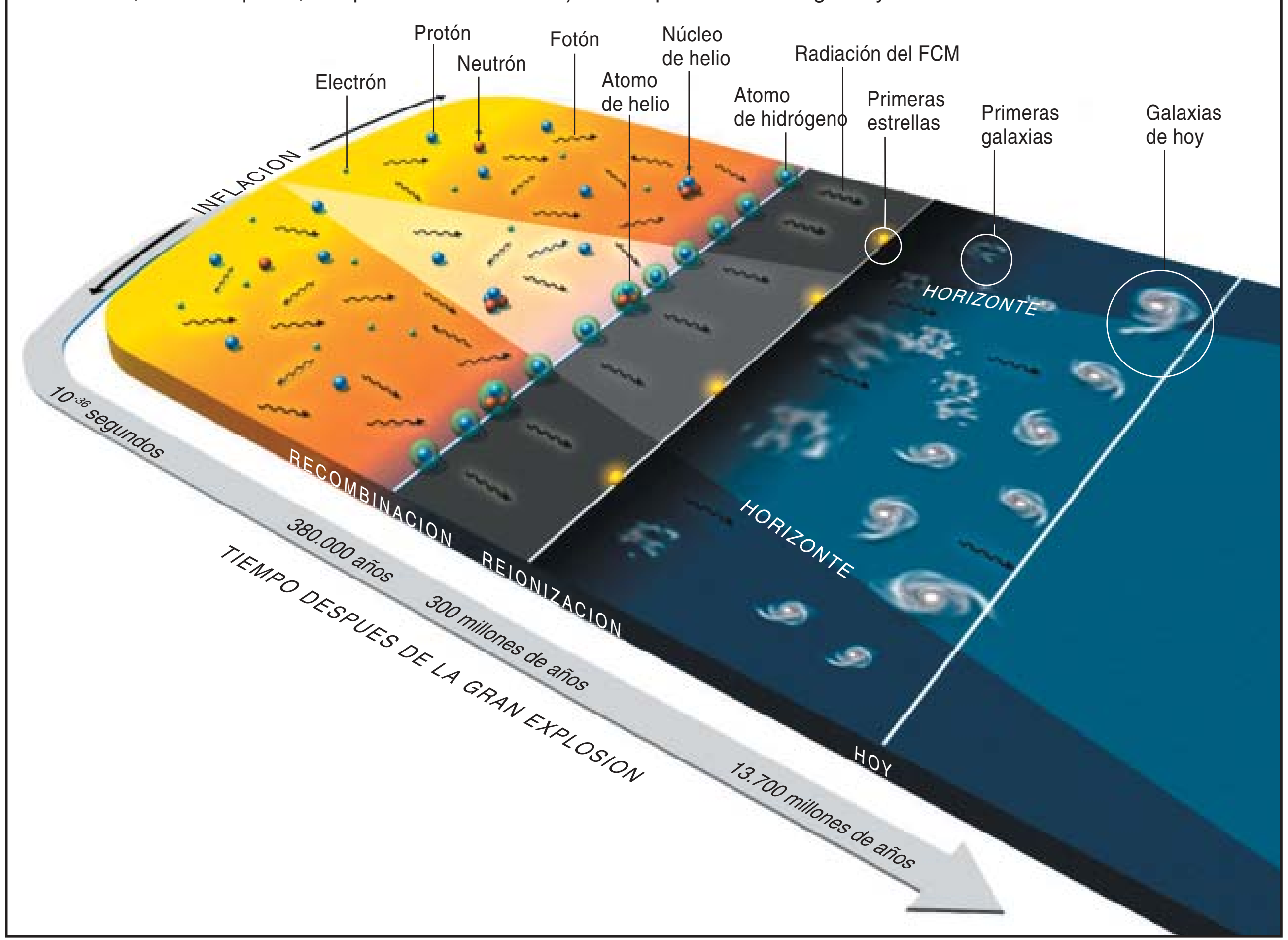
Resumen/Acústica cósmica

- La inflación, la expansión rápida del universo en los primeros momentos tras la gran explosión, desencadenó una serie de ondas acústicas que fueron comprimiendo y enrareciendo regiones del plasma primordial.
- Una vez el universo se enfrió lo suficiente para que se formaran átomos neutros, la estructura de las variaciones de densidad causadas por las ondas acústicas quedaron impresas en la radiación del FCM.
- Las señales acústicas del FCM informan de la edad, composición y geometría del universo. Nos enseñan que el mayor componente del cosmos moderno es una "energía oscura" de naturaleza desconocida.

LA LINEA TEMPORAL DEL UNIVERSO

A MEDIDA QUE LA INFLACION expandía el universo, el plasma de fotones y partículas dotadas de carga desbordó el horizonte (el borde de la región que un observador hipotético de después de la inflación vería a medida que el universo siguiera expandiéndose, más despacio, después de la inflación).

Durante el período de recombinación, unos 380.000 años más tarde, se formaron los primeros átomos y se emitió la radiación del fondo cósmico de microondas. Transcurridos otros 300 millones de años, la radiación de las primeras estrellas reionizó la mayor parte del hidrógeno y del helio.



el espectro de potencia no se ordenaría con tanta armonía. Utilizando de nuevo la analogía del tubo, pensemos en la cacofonía que oiríamos si hubiera agujeros aleatoriamente distribuidos por toda su longitud.

La teoría de la inflación también predice que las ondas acústicas tuvieron la misma amplitud en todas las escalas. El espectro de potencia, sin embargo, presenta una marcada caída en la magnitud de la variación de temperatura después del tercer pico. La explicación de esta discrepancia reside en que las ondas acústicas con longitudes de onda cortas se disipan. Puesto que el choque de las partículas en el gas o plasma transporta el sonido, una onda no se puede propagar si su longitud de onda es más corta que la distancia que de ordinario recorran las partículas entre las colisiones. En el aire, no pasa de 10^{-5} centímetros, pero en el plasma primordial, justo antes de la recombinación, una partícula podía viajar unos 10.000 años luz antes de encontrarse con otra. (El universo era denso en esa etapa sólo en comparación con el universo moderno, mil millones de veces más diluido.) Medida hoy día, tras la expansión en un factor 1000, esa escala viene a ser unos 10 millones de años luz. Por tanto, las amplitudes de los picos en el espectro de potencia están amortiguadas por debajo de unas 10 veces la escala.

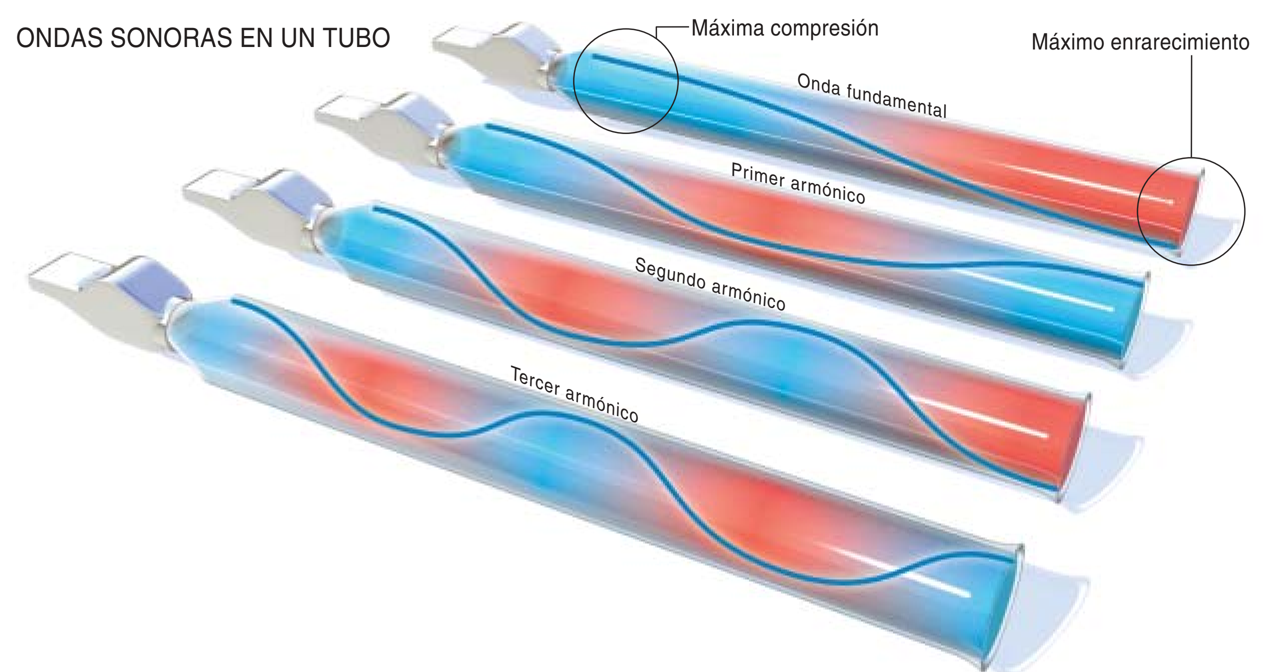
Al igual que los músicos distinguen un violín de calidad de otro común por la riqueza de sus armónicos, los cosmólogos pueden recomponer la forma y la composición del universo mediante el examen de la frecuencia fundamental de las ondas acústicas primordiales y la intensidad de los armónicos. El FCM nos revela el tamaño angular de las variaciones de temperatura más intensas —la magnitud de esas manchas calientes y frías en el cielo—, lo que, a su vez, nos proporciona la frecuencia de la onda fundamental. Se sabe evaluar con precisión el tamaño real de esa onda en el momento de la recombinación porque se conoce la velocidad de propagación del sonido en el plasma pri-

BRYAN CHRISTIE DESIGN

LOS ARMONICOS COSMICOS

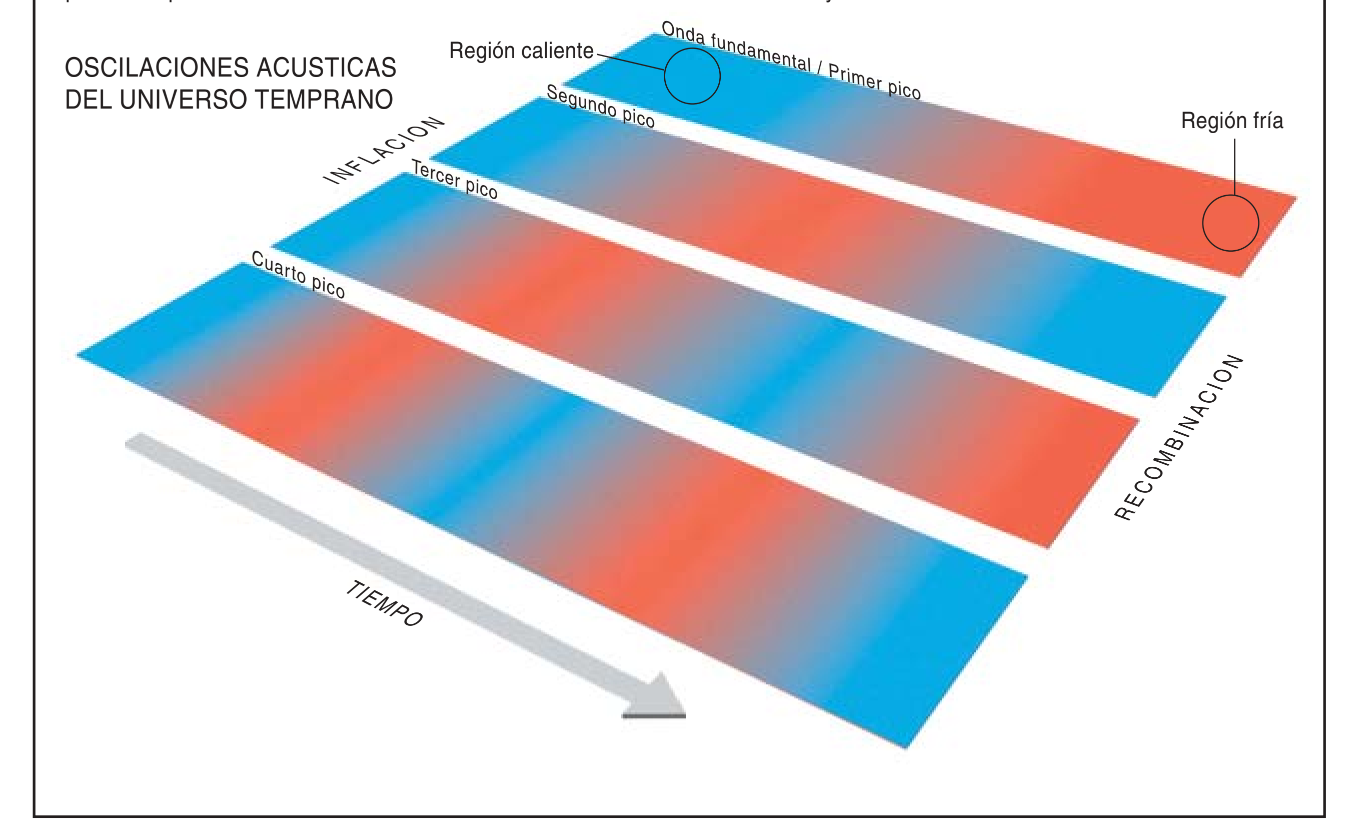
EL ESPECTRO ACUSTICO del universo temprano tenía armónicos, al igual que los instrumentos musicales. Si se sopla por un tubo, el sonido corresponde a una onda que presenta la máxima compresión (*azul*) cerca de la boquilla y la mínima (*rojo*), al final del tubo. Pero el sonido también cuenta con una serie de armónicos de menores longitudes de onda, que corresponden a fracciones enteras de la longitud de onda fundamental. Las longitudes de onda del primer, segundo y tercer armónicos son la mitad, un tercio y una cuarta parte de la longitud fundamental.

ONDAS SONORAS EN UN TUBO



TAMBIEN HABIA ONDAS SONORAS en el plasma del universo primigenio. Tras la inflación, la onda fundamental comprimió algunas regiones y diluyó otras, de modo que la temperatura del FCM alcanzó en esas zonas máximos (*azul*) y mínimos (*rojo*) cuando la recombinación. Los armónicos oscilaban varias veces más rápido, por lo que otras regiones menores también presentaban temperaturas máximas y mínimas en la recombinación.

OSCILACIONES ACUSTICAS DEL UNIVERSO TEMPRANO



BRYAN CHRISTIE DESIGN

mordial. De igual modo, se sabe determinar la distancia que los fotones del FCM han recorrido hasta llegar a la Tierra —unos 45.000 millones de años luz—. (Aunque los fotones sólo han estado viajando unos 14.000 millones de años, la expansión del universo ha alargado el camino.)

Se dispone así de una información completa del triángulo formado por la onda; se puede comprobar, con una gran precisión, si los tres ángulos del triángulo suman 180 grados —la prueba clásica de la curvatura espacial—. Se ha demostrado así que, aparte de la expansión global, el universo obedece las leyes de la geometría euclídea y, por tanto, ha de ser espacialmente casi plano. Y puesto que la geometría del universo depende de su densidad de energía, este descubrimiento apunta a que la densidad media cae cerca de la llamada densidad crítica: unos 10^{-29} gramos por centímetro cúbico.

Materia y energía

A continuación, se querría conocer el proceso exacto de la separación entre la materia del universo y la energía. Las amplitudes de los armónicos dan la respuesta. Las ondas acústicas ordinarias están guiadas sólo por la presión del gas; en cambio, las ondas sonoras del universo primigenio se vieron alteradas por la fuerza de gravedad. La gravedad comprimió el gas en las regiones de mayor densidad y, dependiendo de la fase de la onda acústica, alternativamente intensificó o contrarrestó la compresión o el enrarecimiento. El análisis de la modulación de las ondas determina la fuerza del campo gravitatorio, que a su vez indica la composición de materia-energía del medio.

Tal y como ocurre en el universo de hoy, la materia del universo arcaico se agrupaba en dos categorías: bariones (protones y neutrones), que conforman el grueso de la materia ordinaria, y la materia oscura fría, que es fuente de gravedad pero que nunca se ha detectado porque no interactúa ni con la materia común, ni con la luz de formas que se puedan apreciar. Tanto la materia ordinaria como la oscura proporcionan masa al gas primordial y refuerzan el empuje gravitatorio, pero sólo la materia común sufre las compresiones y diluciones sonoras. En la recombinación, la onda fundamental quedó congelada en la fase en que la gravedad aumenta la compresión de las regiones más densas de gas (*véase el recuadro* “Modulación gravitatoria”). Pero el primer armónico, que tiene la mitad de longitud que la onda fundamental, se congeló en una fase opuesta —la gravedad intenta comprimir el plasma, mientras que la presión del gas trata de expandirlo—. Como resultado, las variaciones de temperatura debidas a este primer armónico son menos pronunciadas que las debidas a la onda fundamental.

Este efecto explica que el segundo pico del espectro de potencia sea menor que el primero. Con la comparación de la altura de los dos picos se calibran las intensidades relativas de la gravedad y la presión de radiación del universo temprano. La medida indica que los bariones tenían casi la misma densidad de energía que los fotones en el momento de la recombinación y, por tanto, constituyen el 5 por ciento de la densidad crítica actual. Es asombrosa la coincidencia de este resultado con el obtenido estudiando la síntesis, mediante reacciones nucleares, de los elementos ligeros del universo.

La teoría general de la relatividad, sin embargo, nos dice que la materia y la energía se atraen por igual. Por tanto, la atracción gravitatoria de los fotones ¿no amplificó también las variaciones de temperatura en los primeros tiempos del universo? Sin duda así fue, pero otro efecto lo contrarrestó. Después de la recombinación, los fotones del FCM procedentes de las regiones más densas perdieron más energía que los fotones de regiones menos densas, porque saltaron barreras de potencial gravitatorio más profundas. Este proceso, el efecto Sachs-Wolfe, disminuyó la amplitud de las variaciones de temperatura del fondo cósmico precisamente en la misma cantidad en que la gravedad de los fotones la incrementó. En aquellas regiones del universo primigenio demasiado grandes para estar sometidas a las oscilaciones acústicas —es decir, las que se extienden más de un grado en el cielo—, las variaciones de temperatura se deben solamente al resultado del efecto Sachs-Wolfe. En estas escalas, paradójicamente, las manchas calientes del FCM representan las regiones menos densas del universo.

Por último, la radiación del FCM sirve para medir la proporción de materia oscura del universo. La gravedad de los bariones no pudo modular por sí sola las variaciones de temperatura más allá del primer pico del espectro de potencia. Se necesitaba cierta cantidad de materia oscura fría para mantener barreras de potencial gravitatorio muy profundas. Midiendo la relación de alturas de los tres primeros picos, se concluye que la densidad de materia oscura debe quintuplicar la densidad bariónica. Por tanto, la materia oscura constituye el 25 por ciento de la densidad crítica actual.

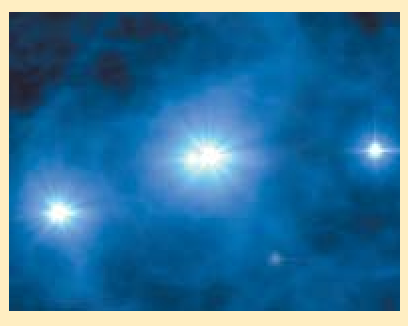
Una armonía notable

Por desgracia, los cálculos de la energía y materia del universo moderno no dicen de qué se compone el 70 por ciento de la densidad crítica. Para cubrir la diferencia, se ha introducido un ingrediente misterioso, la “energía oscura”, cuya influencia relativa ha crecido con la expansión del universo [*véase* “Salir de la oscuridad”, por Georgi Dvali, *en este mismo número*]. Poco a poco nos hemos ido viendo abocados a una conclusión singular: la mayor parte del universo actual está formado por materia oscura invisible y energía oscura. Todavía peor: la materia oscura y la energía oscura parecen tener hoy día una densidad de energía comparable, aun cuando la primera sobrepasaba enormemente a la segunda en la recombinación. A los físicos no les gustan nada las coincidencias; prefieren explicar el mundo en términos de causa y efecto y rechazan las casualidades. Es más, otro componente desconocido, el inflatón, dominó el universo inicial y engendró los precursores de las estructuras cósmicas. ¿Por qué deberíamos creer en un modelo cosmológico que se basa en la inclusión de tres entes enigmáticos?

Pero hay razones para admitir el modelo. La primera, la cantidad de fenómenos ya conocidos que explica. De la materia oscura se habló

DISCORDANCIAS

TRAS LA EMISION de la radiación del FCM, unos 380.000 años después de la gran explosión, la mayoría de los fotones viajaron por el universo sin dispersarse. Pero algunos sí fueron dispersados por partículas cargadas, que polarizaron la radiación a lo largo de anchas franjas de cielo. Las observaciones de esta polarización a gran escala realizadas por el satélite WMAP muestran que una fina niebla de gas ionizado dispersó alrededor del 17 por ciento de los fotones del FCM unos cientos de millones de años después de la gran explosión. Este porcentaje tan alto es quizás una de las mayores sorpresas de los datos del WMAP. Se suponía que la radiación de las primeras estrellas, de una masa y brillo muy grandes, ionizó la mayor parte del hidrógeno y del helio del universo. Este proceso se conoce como reionización, porque devuelve el gas al estado de plasma en que se encontraba antes de la emisión del FCM. Pero se calculaba que ocurrió casi mil millones de años después de la gran explosión; en tal caso, sólo se habría dispersado un 5 por ciento de los fotones. Que WMAP haya observado un porcentaje mayor señala que la reionización sucedió antes. Este descubrimiento pone en un brete a los modelos de formación de las primeras estrellas. Podría también desafiar a la teoría de la inflación, ya que ésta presupone que las fluctuaciones de densidad iniciales del universo primordial eran casi idénticas en todas las escalas. Las primeras estrellas se habrían formado antes si las fluctuaciones de pequeña escala hubieran tenido mayores amplitudes. Otros datos del WMAP también parecen apuntar a la desigualdad de las amplitudes de las fluctuaciones de densidad. La violación de la invariancia de escala ya fue vista por el satélite COBE. En las escalas mayores, más de 60 grados en el cielo, ni WMAP ni COBE hallaron variaciones de temperatura del FCM. Podría ser engañoso: el cielo tiene 360 grados, por lo que no contendría estructuras de gran escala lo suficientemente enormes para un muestreo adecuado que valga para estudiar las variaciones de temperatura. Pero algunos teóricos conjeturan que esta falta de fluctuación térmica evidencia fallos en los modelos de la inflación, la energía oscura o la topología del universo.



Las primeras estrellas reionizaron el gas circundante.

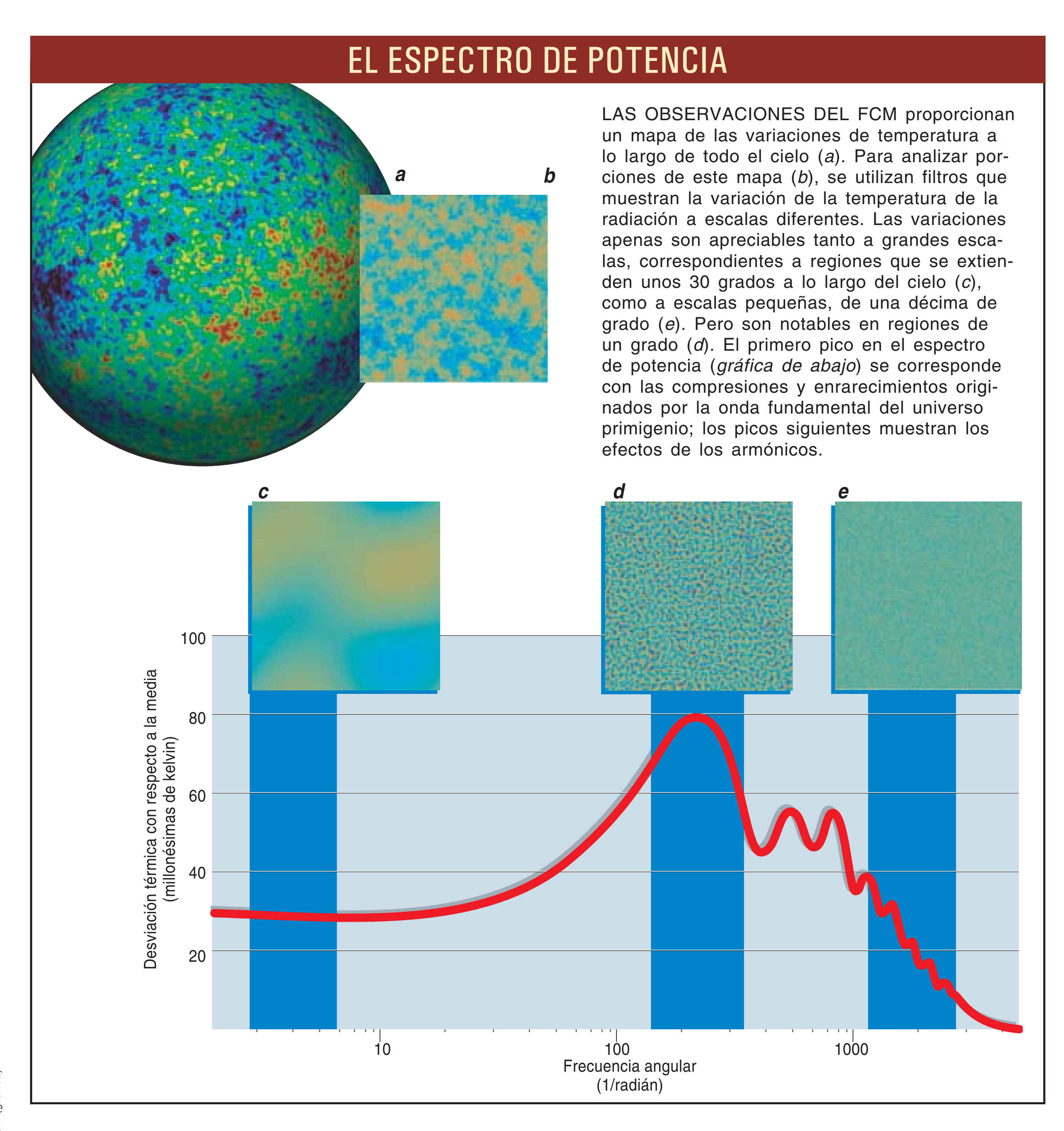
NASA/WMAP SCIENCE TEAM

por primera vez en el decenio de 1930 para explicar los resultados de las mediciones de la densidad local de materia en los cúmulos de galaxias. Albert Einstein introdujo el concepto de energía oscura en 1917, cuando incluyó la constante cosmológica en su ecuación para contrarrestar la energía gravitatoria. Mas tarde negó la constante, pero ésta resucitó en el decenio de 1990, cuando las observaciones de supernovas lejanas probaron que la expansión del universo se está acelerando [*véase* "Cuando la aceleración cambió de signo", por Adam G. Riess y Michael S. Turner, *en este mismo número*]. Las densidades de la materia oscura y la energía oscura medidas gracias al FCM concuerdan de manera asombrosa con las observaciones astronómicas.

Una segunda razón: el modelo cosmológico estándar tiene poder predictivo. En 1968, Joseph Silk (ahora en la Universidad de Oxford) predijo que los picos acústicos de pequeña escala del FCM deberían amortiguarse de una forma particular y calculable. Como resultado, la radiación correspondiente adquiriría una polarización pequeña, aunque precisa (la luz polarizada está orientada en una dirección particular). En un principio se esperaría que el FCM de microondas no estuviera polarizado: los fotones del plasma primordial se dispersaban aleatoriamente, sin ninguna dirección privilegiada. Pero a pequeña escala, donde tiene lugar el amortiguamiento, sufren en su propagación sólo unas pocas dispersiones, por lo que retienen una información direccional cuya huella es la polarización de la radiación del FCM. Esta polarización acústica se cuantificó con el interferómetro de escala angular en torno a un grado (instrumento instalado en la Estación Amundsen-Scott del Polo Sur) y más tarde con el WMAP. Las medidas coinciden perfectamente con las predicciones. WMAP detectó también una polarización procedente de regiones de mayor escala, originada por la dispersión de los fotones del fondo cósmico después de la recombinación.

Además, la existencia de la energía oscura predice otros fenómenos del FCM que se empiezan a observar. Puesto que la energía oscura acelera la expansión del universo, también debilita los pozos de potencial gravitatorio asociados a los cúmulos de galaxias. Un fotón que atraviese un cúmulo recibirá un impulso de energía al caer en su pozo de potencial, pero puesto que éste será menos hondo para cuando vaya a salir del mismo, perderá entonces menos energía de la que ganó al entrar. Este fenómeno, conocido como "efecto integrado de Sachs-Wolfe", causa variaciones de temperatura a gran escala en el fondo cósmico. Se han observado indicios de esta correlación al comparar las grandes estructuras de las cartografías galácticas con los datos de WMAP. La cantidad de energía oscura requerida para producir las variaciones de temperatura de las grandes escalas concuerda con las obtenidas a partir de los picos acústicos y de las supernovas lejanas. A medida que los datos de esas cartografías mejoren y se encuentren otros trazadores de la estructura a gran escala del universo, el efecto integrado

EL ESPECTRO DE POTENCIA



LAS OBSERVACIONES DEL FCM proporcionan un mapa de las variaciones de temperatura a lo largo de todo el cielo (*a*). Para analizar porciones de este mapa (*b*), se utilizan filtros que muestran la variación de la temperatura de la radiación a escalas diferentes. Las variaciones apenas son apreciables tanto a grandes escalas, correspondientes a regiones que se extienden unos 30 grados a lo largo del cielo (*c*), como a escalas pequeñas, de una décima de grado (*e*). Pero son notables en regiones de un grado (*d*). El primero pico en el espectro de potencia (*gráfica de abajo*) se corresponde con las compresiones y enrarecimientos originados por la onda fundamental del universo primigenio; los picos siguientes muestran los efectos de los armónicos.

NASA/WMAP SCIENCE TEAM (*a–e*); BRYAN CHRISTIE DESIGN (*gráfica*)

de Sachs-Wolfe podría convertirse en una fuente de información crucial acerca de la energía oscura.

No se ha descubierto todo

También puede que el FCM encierre la clave de lo ocurrido durante los primeros momentos tras la gran explosión. Pocos aspectos de la cosmología tan peculiares como el período de inflación. ¿Existió realmente? Si existió, ¿cuál fue la naturaleza del inflatón, el campo que, según los teóricos, originó aquella expansión desbocada? Las mediciones actuales del FCM han resultado muy favorables para los modelos más simples de la inflación, que parten de la identidad de las fluctuaciones iniciales de densidad en todas las escalas. Pero si observaciones más detalladas del FCM concluyeran que las amplitudes fueron distintas en escalas diferentes, los modelos simples se encontrarían en apuros. Habría que acudir a alternativas más alambicadas o adoptar paradigmas diferentes.

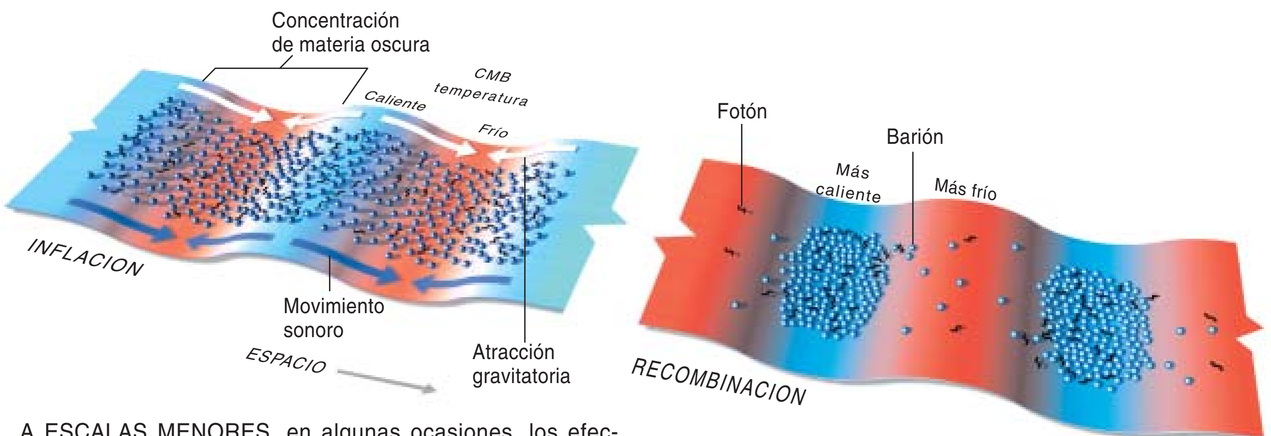
Otra atractiva posibilidad consistiría en que pudiésemos determinar la escala de energía de la era de la inflación. Por ejemplo, se piensa que las fuerzas nuclear débil y electromagnética son aspectos distintos de una única fuerza electrodébil, existente cuando el universo superaba los 10^{15} kelvin de temperatura. Si la inflación ocurrió a esas altas temperaturas, el inflatón guardaría alguna relación con la unificación electrodébil. O bien, la inflación pudo ocurrir a temperaturas

MODULACION GRAVITATORIA

LA MATERIA OSCURA modula las señales acústicas en la radiación del FCM. Tras la inflación, las regiones más densas en materia oscura que tenían la misma escala que la onda fundamental (representadas con valles en este diagrama de la energía potencial) agruparon bariones y fotones mediante la atracción gravitatoria. Los valles se pintan de rojo porque la gravedad también reduce la temperatura de los fotones que escapan. Hasta la recombinación, unos 380.000 años más tarde, la gravedad y el movimiento acústico aumentaron de consuno la temperatura de la radiación en los valles (*azul*) y la disminuyeron en los picos (*rojo*).

PRIMER PICO

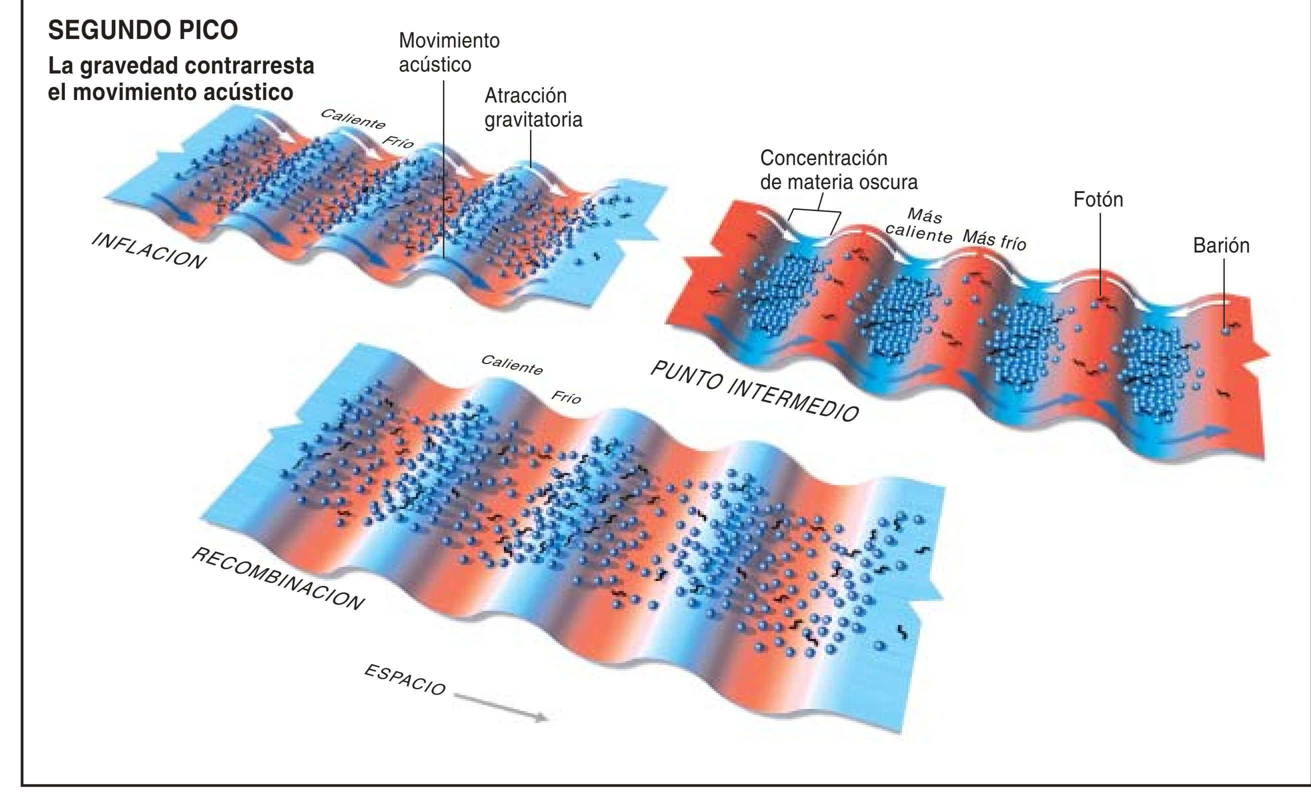
La gravedad y el movimiento acústico operan juntos



A ESCALAS MENORES, en algunas ocasiones, los efectos de la gravedad y la presión acústica se oponen. Las acumulaciones de materia oscura correspondientes a un segundo pico maximizaron la temperatura de la radiación en los valles bastante antes de la recombinación. Tras este punto intermedio, la presión del gas empuja a bariones y fotones fuera de los valles (*flechas azules*), mientras que la gravedad tiende a atraerlos a ellos (*flechas blancas*). Este tira y afloja reduce las diferencias de temperatura; por esa razón, el segundo pico del espectro de potencia es menos intenso que el primero.

SEGUNDO PICO

La gravedad contrarresta el movimiento acústico



BRYAN CHRISTIE DESIGN

aún mayores, a las que se fusionaría la fuerza electrodébil con la interacción nuclear fuerte. En ese caso, la inflación estaría relacionada con la gran unificación de las fuerzas elementales.

Cierto rasgo del FCM quizá resuelva el dilema. La inflación no sólo produjo perturbaciones de densidad; también generó fluctuaciones en el espacio-tiempo mismo, ondas gravitatorias cuyas longitudes de onda se extienden por todo el universo observable. Su amplitud es proporcional al cuadrado de la escala de energía a la que ocurrió la inflación. Si la inflación tuvo lugar a muy altas energías, relacionadas con la gran unificación de fuerzas, sus efectos deberían ser visibles en la polarización de la radiación del FCM.

Por último, la observación del FCM podría arrojar nueva luz sobre la naturaleza física de la energía oscura. Este ente representaría una forma de energía del vacío, como Einstein supuso, aunque su valor debería ser al menos 60 órdenes de magnitud, y quizá hasta 120, inferior a lo predicho por la física de partículas. Y ¿por qué es la densidad de la energía oscura comparable a la de la materia oscura ahora y sólo ahora? Para responder hay que sacar partido de que los fotones del FCM iluminan las estructuras a lo largo de todo el universo observable. Al registrar las amplitudes de las fluctuaciones de densidad en puntos diferentes de la evolución cósmica, el fondo cósmico guarda en sí la historia del compromiso entre la materia y la energía oscuras.

Dos fenómenos del FCM parecen de especial utilidad. El primero, el efecto Sunyaev-Zel'dovich, se da cuando el gas ionizado caliente de los cúmulos de galaxias dispersa los fotones del FCM. Gracias a él se identifican cúmulos de galaxias del período crucial, hace unos cinco mil millones de años, cuando la energía oscura comenzó a acelerar la expansión del universo. El número de cúmulos de galaxias, a su vez, es un reflejo de la amplitud de las fluctuaciones de densidad en aquella época. El segundo fenómeno, la lente gravitatoria, ocurre cuando los fotones del fondo cósmico pasan cerca de una estructura de gran masa, que dobla sus trayectorias y distorsiona el patrón de las variaciones de temperatura y polarización. La magnitud del efecto de la lente refleja la amplitud de las fluctuaciones de densidad de masa correspondientes a las estructuras que lo generan.

Para llevar a cabo todos estos estudios de la inflación y la energía oscura, se requiere una nueva generación de telescopios que puedan observar la radiación del FCM con una mayor resolución y sensibilidad. Para el año 2007 la Agencia Espacial Europea tiene programado lanzar el satélite Planck, observatorio de microondas que se situará en la misma órbita que WMAP. Medirá diferencias de temperatura del fondo cósmico de sólo cinco millonésimas de kelvin y detectará manchas calientes y frías que subtiendan menos de una décima de grado en el cielo. Con mediciones así, se muestreará el rango completo de las oscilaciones acústicas del FCM y, por tanto, mejorará nuestro conocimiento del espectro inflacionario. Muchos otros experimentos en tierra se hallan también en fase de proyecto para el estudio de efectos del FCM ligados a las estructuras en la época actual de expansión acelerada.

Los autores

Wayne Hu y **Martin White** investigan la historia del universo. Hu es profesor asociado de astronomía y astrofísica de la Universidad de Chicago. Recibió su doctorado en física en 1995 por la Universidad de California en Berkeley. White, profesor de astronomía y física en Berkeley, obtuvo su doctorado en 1992 en la Universidad de Yale.

Bibliografía complementaria

WRINKLES IN TIME. George Smoot y Keay Davidson. William Morrow, 1994.

3K: THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND RADIATION. R. B. Partridge. Cambridge University Press, 1995.

THE INFLATIONARY UNIVERSE: THE QUEST FOR A NEW THEORY OF COSMIC ORIGINS. Alan H. Guth y Alan P. Lightman. Perseus, 1998.

Los planos de la creación

La elaboración de los mapas del cosmos más recientes ha requerido el estudio de cientos de miles de galaxias. Las estructuras cósmicas en que se reparten derivan de fluctuaciones de la materia en el universo primigenio

Michael A. Strauss

La cosmología, ciencia que estudia el universo como un todo, era, hasta hace sólo veinticinco años, un campo feraz en especulaciones pero parco en hechos claros. La situación ha cambiado de forma radical desde entonces merced a nuevas observaciones y trabajos teóricos. La cosmología ha pasado a ser una rama rigurosa y cuantitativa de la astrofísica, dotada de fundamentos teóricos sólidos que cuentan con el respaldo de abundantes datos. El modelo de la gran explosión, que afirma que el universo comenzó a expandirse hace casi 14.000 millones de años a partir de un estado de densidad y temperatura inconcebiblemente grandes, explica los movimientos de las galaxias, la abundancia de hidrógeno y helio, y las propiedades de la radiación cósmica de fondo en la banda de las microondas (o FCM, Fondo Cósmico de Microondas), el calor remanente de un gas cósmico que se expande y enfría.

La cosmología puede ahora elevarse un peldaño más y afirmar que posee una teoría de la formación de estructuras en el universo. La distribución de galaxias a grandes escalas, establecida por proyectos de cartografiado digital del firmamento como el Sloan Digital Sky Survey (en lo sucesivo, SDSS), todavía en curso, muestra una hermosa concordancia con las predicciones teóricas. Contamos en la actualidad con un modelo coherente capaz de trazar la evolución del universo, desde las mínimas fluctuaciones de la densidad del universo primigenio hasta la riqueza y variedad que exhibe ahora el firmamento nocturno.

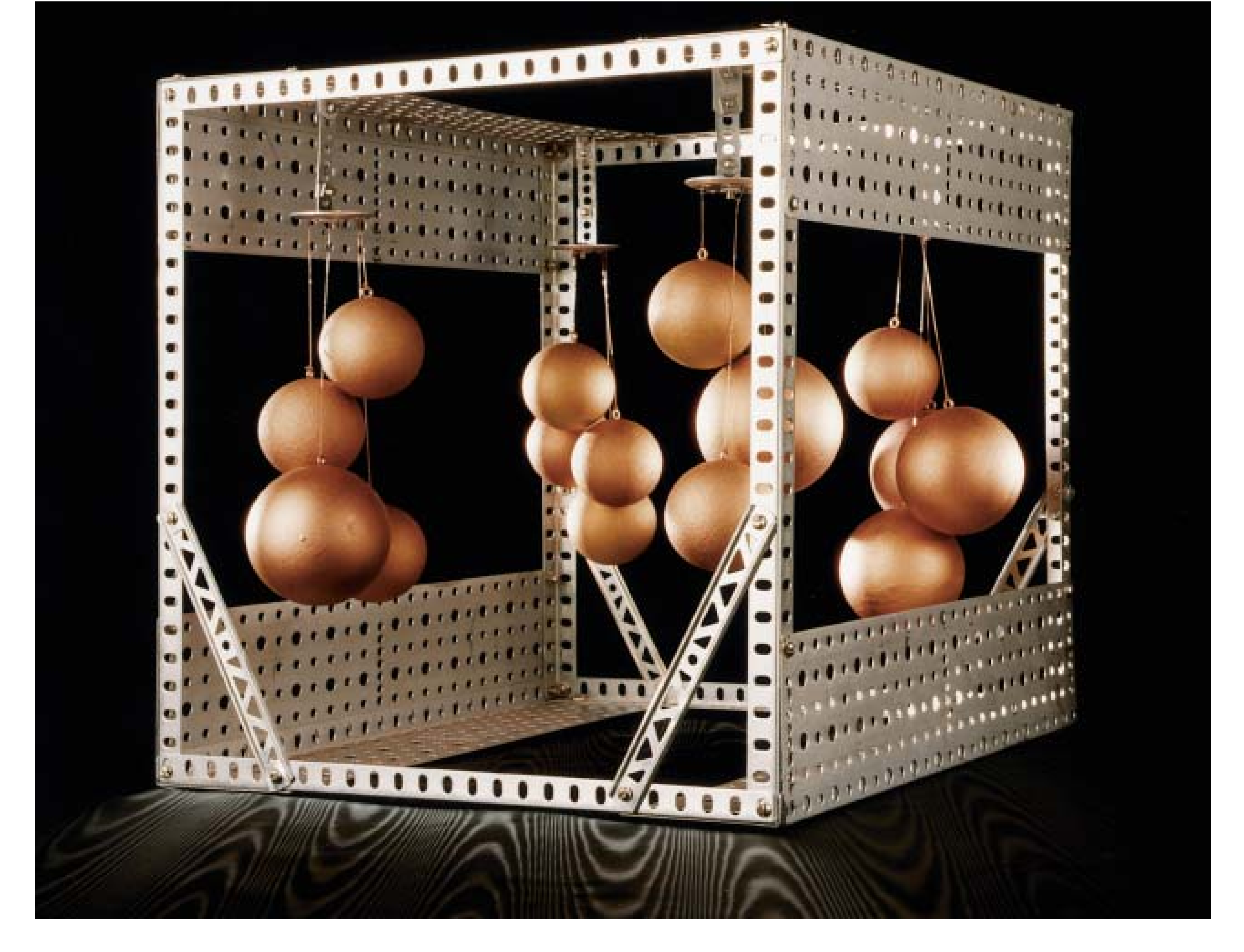
El universo que nos rodea exhibe estructura a todas las escalas. Las estrellas no se hallan uniformemente distribuidas por el espacio, sino agrupadas en galaxias. Nuestro Sol no es sino una de los varios cientos de miles de millones de estrellas que integran la Vía Láctea, disco muy aplanado de unos 100.000 años luz de diámetro. La Vía Láctea, por su parte, es una entre las decenas de miles de millones de galaxias que contiene el universo observable. De las grandes galaxias, la más cercana dista de nosotros unos dos millones de años luz. Pero las galaxias no se encuentran repartidas al azar, como pasas de un budín. Entre un 5 y un 10 por ciento de ellas están apiñadas en cúmulos que contienen hasta 1000 galaxias en un volumen de pocos millones de años luz de diámetro.

La mayoría de los astrónomos juzgaba que los cúmulos de galaxias constituían las estructuras coherentes de mayor tamaño existentes. Pues si bien las estrellas forman parte de galaxias y muchas galaxias pertenecen a cúmulos, no parecía que los cúmulos se hubieran congregado en cuerpos aún mayores. Esta distribución encajaba pulcramente con la imagen de la gran explosión que se hacían los teóricos. Cuando Einstein aplicó por primera vez al universo su teoría de la relatividad general, introdujo una simplificación radical, a saber, que el universo, en promedio, era homogéneo (que no tenía grandes grumos) e isótropo (que ofrecía el mismo aspecto en todas las direcciones). Dio a tal hipótesis el nombre de "principio cosmológico". Aún subyace a todos los modelos científicos del universo.

El descubrimiento de las grandes estructuras

Para verificar el principio cosmológico más allá de los cúmulos galácticos hay que sondear lejos. Al observar el firmamento nocturno a través de un telescopio, el ocular nos revela planetas, estrellas y galaxias. Pero, faltos de otra información, nos resultará imposible saber si los objetos son pequeños y cercanos o grandes y distantes. Por fortuna, el telescopio puede proporcionarnos esa información. Por lo que se refiere a las galaxias, la clave consiste en que el universo en que vivimos se expande. Las galaxias se están separando unas de otras; cuanto más distante se encuentra una galaxia, tanto más rápidamente se aleja

DAVID EMMITE (*fotografía*)



EL UNIVERSO SE HALLA muy estructurado a escalas de hasta unos 1000 millones de años luz. La materia no se halla distribuida al azar, sino organizada por la gravedad.

de nosotros. Dicho movimiento se manifiesta en forma de un corrimiento o traslación hacia el rojo en su espectro. La energía de los fotones que emite decrece (se desplaza su longitud de onda desde el azul hacia el rojo) en una magnitud que es función de su distancia. Una vez que se ha podido determinar esta relación para objetos situados a distancias conocidas, se la utiliza para estudiar galaxias que se encuentren a distancias desconocidas. Para ello se analizan los espectros de la luz de las galaxias, se determina cuánto es su corrimiento hacia el rojo y se infiere de él a qué distancia se hallan.

Los progresos en telescopios y técnicas de detección de hará unos 30 años permitieron realizar estudios muy amplios de los corrimientos al rojo de las galaxias y confeccionar mapas tridimensionales del cosmos local. Siendo todavía estudiante de primer ciclo, leí un artículo de Stephen A. Gregory y Laird A. Thompson [*publicado en* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, "Supercúmulos y vacíos en la distribución de galaxias", mayo de 1982], donde se detallaban algunos de estos primeros mapas tridimensionales. Los autores dejaban entrever la posibilidad de que el principio cosmológico de Einstein no fuese correcto, pues se habían descubierto estructuras coherentes mucho mayores que los cúmulos o agregaciones individuales, amén de espacios vacíos de muchas decenas de millones de años luz. El artículo me dejó fascinado. Este ejercicio de cosmografía, el descubrimiento de estructuras completamente nuevas en el universo, me hizo sentir que era una de las cosas más apasionantes acontecidas en la ciencia. Me encaminó hacia mi profesión actual.

En 1986, Valérie de Lapparent, Margaret J. Geller y John P. Huchra, del Centro de Astrofísica Smithsoniano de Harvard (CfA), publicaron un mapa con la distribución de 1100 galaxias, extraído de lo que acabaría siendo un catálogo de 18.000 galaxias. Confirmaba la abundancia y ubicuidad de las grandes estructuras. Ponía de manifiesto que la distribución de galaxias se asemejaba a la espuma marina; las galaxias se hallaban localizadas a lo largo de filamentos y dejaban inmensos espacios vacíos. Uno de los accidentes más caracterizados del mapa era una estructura a la que se dio el nombre de "Gran Muralla"; se extendía a lo largo de 700 millones de años luz de uno a otro extremo de la región examinada. Como el mapa no llegaba a revelar dónde terminaba, su extensión total era desconocida.

La presencia de la Gran Muralla y la incertidumbre sobre su extensión alentó la sospecha de que el principio cosmológico pudiera no ser correcto y, con ello los fundamentos teóricos del universo en expansión. ¿Se había equivocado Einstein? ¿Pudiera el universo no ser homogéneo en promedio? Era obvio que para averiguarlo se tendrían que examinar volúmenes más grandes.

El paradigma de la gran explosión sostiene que la estructura que le vemos hoy a la distribución de galaxias se desarrolló a partir de variaciones existentes en un universo arcaico de lisura casi perfecta. Estas fluctuaciones iniciales eran sutiles; la variación de densidad de una región a otra venía a ser tan sólo de una parte en 100.000, como se deduce de la medición de la temperatura del FCM. Una región del espacio más densa que la media ejercería una atracción más intensa; la materia de sus cercanías se vería arrastrada hacia ella. Análogamente, una región del espacio menos densa que el promedio iría perdiendo masa con el tiempo. Esta inestabilidad gravitatoria acabó convirtiendo las regiones más densas en los inmensos supercúmulos galácticos que observamos hoy; las regiones de menor densidad se trocaron en inmensos huecos vacíos.

Materia oscura caliente y fría

Hacia la época, poco más o menos, en que se concluyeron los primeros estudios sistemáticos de los corrimientos al rojo, la investigación tomaba un nuevo cariz al descubrirse que las estrellas y el gas que vemos en las galaxias constituyen sólo una pequeña fracción (en torno al 2 por ciento) de la materia total del universo. El resto de la materia se manifiesta de forma indirecta por sus efectos gravitatorios. Se ha propuesto una gran variedad de modelos para describir esta materia oscura. Los podemos clasificar en dos grandes categorías, calientes y fríos; la diferencia es crucial para la evolución de la estructura cósmica.

En la hipótesis de la materia oscura fría, enunciada, entre otros, por James E. Peebles, de la Universidad de Princeton, las primeras estructuras que se formaron fueron objetos hasta cierto punto pequeños, como galaxias y fragmentos de galaxias. Con el paso del tiempo, la gravitación fue integrando dichas piezas en estructuras todavía mayores. La Gran Muralla no se habría formado pronto. Según el modelo de la materia oscura caliente, de Yakov B. Zel'dovich y sus colaboradores de la Universidad estatal de Moscú, la materia oscura se movió en el universo primitivo a velocidad suficiente para alisar a escalas pequeñas cualquier aglomeración no muy grande. Los primeros objetos que se constituyeron fueron grandes láminas y filamentos, de una extensión de decenas o centenares de millones de años luz, que sólo posteriormente se fragmentaron y crearon galaxias. La Gran Muralla sería muy antigua.

Así pues, las cartografías cósmicas de la generación siguiente no sólo deberían poner a prueba el principio cosmológico de Einstein; tendrían también que sondear la naturaleza de la materia oscura. Entre 1988 y 1994 llevaron a cabo un estudio así Stephen A. Shectman, de la Institución Carnegie de Washington, y sus colaboradores, valiéndose del telescopio de 2,5 metros del observatorio de Las Campanas, en Chile [*véase* "Cartografía del universo", por Stephen D. Landy, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1999]. Midieron 26.418 corrimientos al rojo de galaxias; cubrieron un volumen apreciablemente mayor que el estudio de CfA. La exploración de Las Campanas dio con "el límite de lo grande", en palabras de Robert P. Kirshner, de la CfA. Encontró una distribución de galaxias similar a la obtenida por la CfA, pero no observó estructuras mucho mayores que la Gran Muralla. El principio cosmológico de Einstein parecía seguir en vigor: promediado sobre distancias colosales, el cosmos es homogéneo e isótropo.

Aun así, Las Campanas no había abarcado tanto como para resultar concluyente. Nada decía sobre lo que había en regiones del espacio que midieran de mil a dos mil millones de años luz. Precisamente a esas grandes escalas es donde resulta más fácil explicar el apiñamiento y más difícil medirlo. Las variaciones en los números de galaxias comprendidas en tan gran volumen son sutiles; es fácil que se deslicen errores en la muestra: artefactos del procedimiento de selección podrían pasar por agregaciones reales.

En un estudio de corrimientos hacia el rojo, se tiene por norma seleccionar todas las galaxias de brillo superior a cierto umbral. Si se sobrestiman los brillos de las galaxias en una parte del firmamento, la muestra contendrá un número excesivo de galaxias de esa región; se tendría una evaluación falsa de su apiñamiento. En consecuencia, una exploración concluyente del corrimiento hacia el rojo no sólo ha de inspeccionar un volumen inmenso, sino que ha de estar muy bien calibrada.

En noches estrelladas

En las postrimerías de los años ochenta, James E. Gunn, de Princeton, Richard G. Kron y Donald G. York, de la Universidad de Chicago, entre otros, se propusieron afrontar como era debido el problema. Tomaron como objetivo medir la distribución de galaxias en el mayor volumen inspeccionado hasta la fecha con un cuidadoso control de la calibración. Unos diez años más tarde se emprendía el Estudio Digital Sloan de los Cielos, el SDSS antes mencionado, en el que cooperan 200 astrónomos, con un presupuesto de unos 70 millones de

Resumen/Estructura cósmica

- Los astrónomos, a modo de cartógrafos del cosmos, están confeccionando mapas tridimensionales cada vez más detallados de las ubicaciones de las galaxias y de los cúmulos galácticos. La más ambiciosa de estas empresas, el Estudio Digital Sloan de los Cielos, está localizando un millón de galaxias situadas en un radio de 2000 millones de años luz.
- Los mapas muestran que las galaxias se organizan en estructuras colosales, que abarcan cientos de millones de años luz. Se ha cuantificado con gran precisión el grado de apiñamiento. Los resultados concuerdan con el que se calcula al extrapolar hasta el presente las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas. Significa que por fin se dispone de una descripción coherente de lo acontecido en 14.000 millones de años de evolución cósmica.

LA EXPLORACION DEL COSMOS EN CUATRO DIFICILES PASOS

EL ESTUDIO DIGITAL SLOAN (SDSS), la más avanzada de la tanda actual de exploraciones astronómicas, está levantando el atlas de un cuadrante del cielo. Dedicará a ello cinco años; utiliza en exclusiva un telescopio de 2,5 metros instalado en lo alto de Apache Point, en Nuevo México.



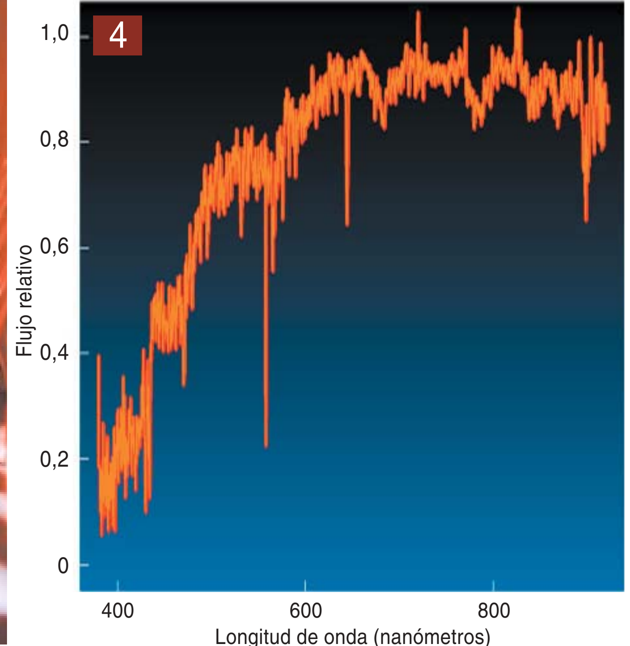
EL TELESCOPIO actúa en modalidad de cámara en las noches estrelladas. Toma fotografías a través de cinco filtros de color a razón de 20 grados cuadrados por hora; cada una de esas noches capta la luz de millones de objetos celestes.



LAS GALAXIAS y demás cuerpos celestes se identifican por medios informáticos y se los selecciona para su posterior estudio espectroscópico. El objeto aquí mostrado es la galaxia espiral UGC 03214, que se encuentra en la constelación de Orión.



LAS FIBRAS OPTICAS se insertan en una placa metálica que cuenta con 640 perforaciones. Cada fibra canaliza la luz procedente de un cuerpo celeste hacia un espectrógrafo, que opera en las noches menos limpias.

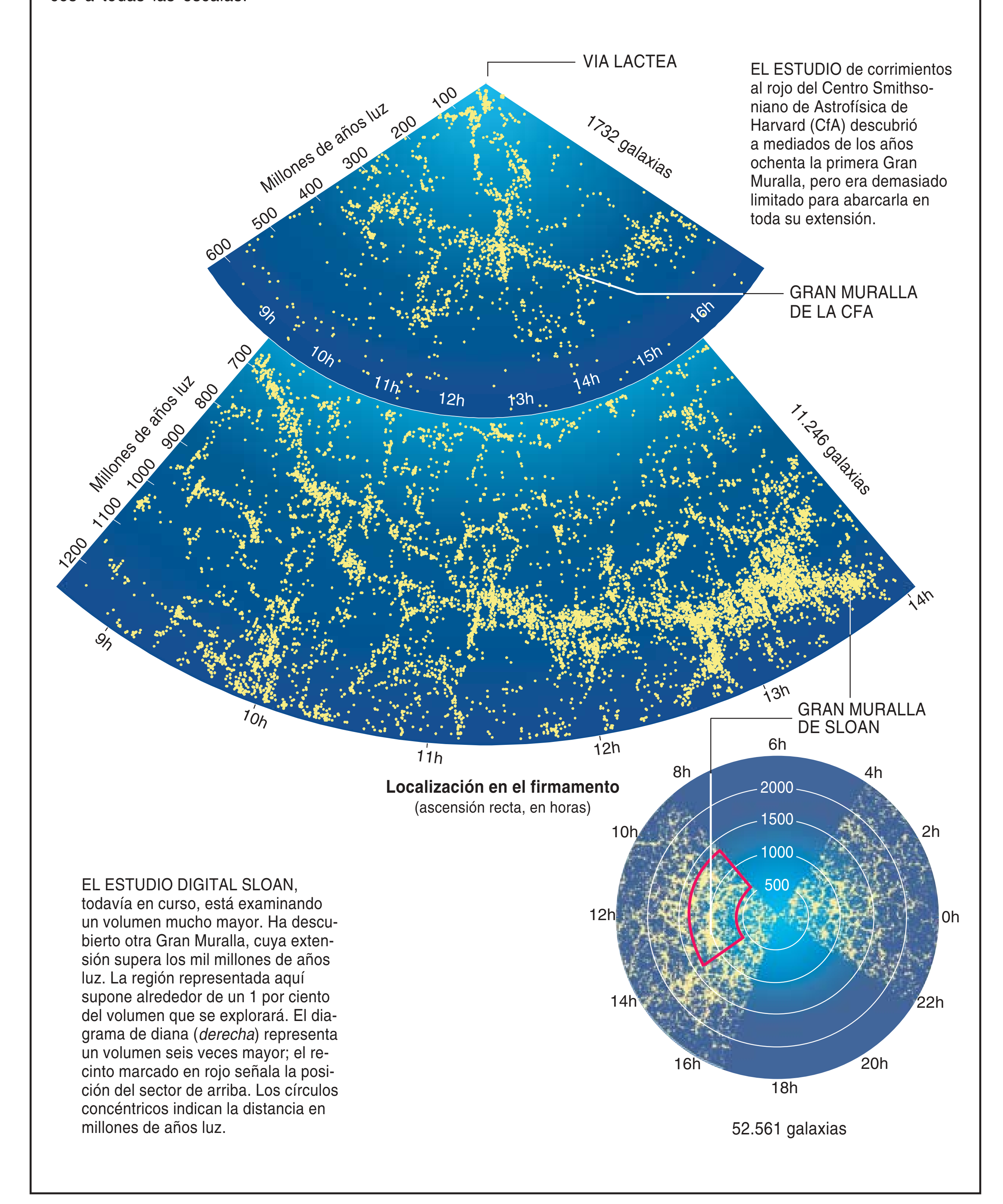


LOS ESPECTROS resultantes proporcionan un método preciso de clasificación de objetos celestes. Determinan sus corrimientos hacia el rojo y en consecuencia, la distancia a que se encuentran.

SDSS

MAPAS COSMICOS

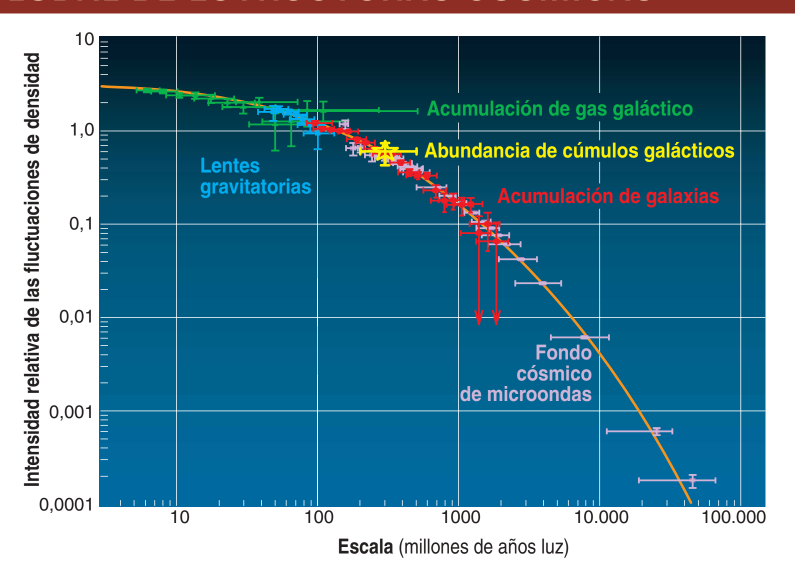
EN ESTOS SECTORES CIRCULARES podemos ver la distribución de galaxias (*puntos*) en dos volúmenes de espacio. La tercera dimensión, que cubre un ángulo de 70 grados, se ha aplanado. Las figuras revelan dos impresionantes "Grandes Murallas" que contienen millares de galaxias cada una, así como filamentos y huecos a todas las escalas.



BRYAN CHRISTIE DESIGN; FUENTES: J. RICHARD GOTT Y MARIO JURIC *Universidad de Princeton* (*arriba*); SDSS (*abajo*)

LA DISTRIBUCION GLOBAL DE ESTRUCTURAS COSMICAS

LOS MAPAS GALACTICOS producidos por los censos telescópicos pueden resumirse en un espectro de potencia que representa la razón de variación de la densidad (*eje de ordenadas*) al pasar de unas regiones a otras, para distintos tamaños de esas regiones (*eje de abscisas*). Es posible representar de igual forma otros datos, como los relativos a la radiación de fondo de microondas, las lentes gravitatorias, los cúmulos galácticos o las nubes de hidrógeno gaseoso. Todos siguen una curva universal (*línea continua*). Las fluctuaciones relativas tienden a cero, ratificando el principio cosmológico de Einstein. Las flechas representan límites superiores.



euros. Cuenta con un telescopio exclusivo; su espejo primario mide 2,5 metros de diámetro. Tiene dos modalidades de funcionamiento. En las noches de cielo más limpio se vale de una cámara de gran anchura de campo para tomar imágenes del firmamento nocturno, calibradas en cinco amplios anchos de banda. La cámara lleva sensores CCD (dispositivos de acoplamiento de carga); la respuesta de estos detectores electrónicos se puede calibrar con una precisión del 1 por ciento.

En las noches con luz lunar o una ligera capa nubosa, toma con un par de espectrógrafos los espectros, y en consecuencia los corrimientos al rojo, de 608 objetos a la vez. Como elementos de referencia, el telescopio obtiene también los espectros de 32 parcelas vacías del firmamento. Este telescopio, a diferencia de los tradicionales, cuyas noches se reparten entre muchos programas científicos, se dedica exclusivamente al Estudio, y así cada noche de cinco años. El proyecto se encuentra ahora a medio camino en su objetivo de medir un millón de corrimientos al rojo de galaxias y cuásares. Hemos finalizado hace poco un análisis de las primeras 200.000 galaxias con corrimientos al rojo.

Un equipo de astrónomos australianos y británico se ha embarcado en una empresa similar. Han construido un espectrógrafo para el Telescopio Anglo-australiano de 3,9 metros, capaz de medir al mismo tiempo los espectros de 400 objetos situados en un campo de 2 grados de lado (por lo que se ha ganado el apodo de 2dF, "campo de dos grados"). El equipo del 2dF ha trabajado a partir de los catálogos disponibles de galaxias, extraídos de atlas fotográficos muy bien calibrados y digitalizados electrónicamente. Esta investigación, ya concluida, ha medido los corrimientos al rojo de 221.414 galaxias a lo largo de un período de cinco años.

Ambos estudios describen la distribución de galaxias. No ven la materia oscura, que constituye el grueso de la masa del universo. No existen razones para suponer que la distribución de galaxias sea la misma que la distribución de materia oscura. Las galaxias podrían, por ejemplo, formarse solamente en regiones que contuvieran una densidad de materia oscura superior a la media, una hipótesis a la que los astrónomos denominan "sesgo."

Mis compañeros y yo habíamos demostrado mediante el análisis de estudios de corrimiento al rojo de viejo cuño que las distribuciones de galaxias y de materia oscura guardaban una estrecha relación, pero nos vimos incapaces de discriminar entre los modelos sencillos con sesgo y la carencia de sesgo. Hace menos, Licia Verde, de la Universidad de Pennsylvania, y sus compañeros se han valido del estudio 2dF para medir ternas de galaxias. Su número depende de la masa total, materia oscura incluida. Hallaron que la distribución de galaxias no presenta sesgo: el campo de densidad de galaxias coincide con el de materia oscura. Las cartografías galácticas reflejan de forma precisa la organización global de materia en el cosmos.

El espectro de potencia

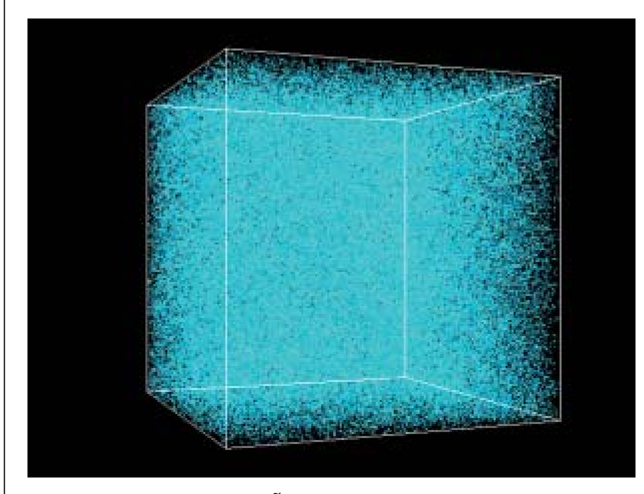
Solventada esta dificultad, cabe interpretar los mapas de galaxias. Uno de los instrumentos estadísticos más útiles para describir los cúmulos galácticos es el espectro de potencia. Imaginemos distribuidas al azar por el universo una serie de esferas de radio dado (de 40 millones de años luz, pongamos por caso) y supongamos que fuera posible contar el número de galaxias que contiene cada una. Dado que las galaxias forman piñas, tal número variará sustancialmente de una esfera a otra. La variación en el número de galaxias proporciona una medida del grado de apiñamiento de la distribución de galaxias a esa escala, en este ejemplo la de 40 millones de años luz. Se repite el proceso con esferas de diferentes radios, al objeto de medir el apiñamiento a distintas escalas.

Recuerda al análisis de un sonido complejo por descomposición en ondas sonoras de distintas longitudes

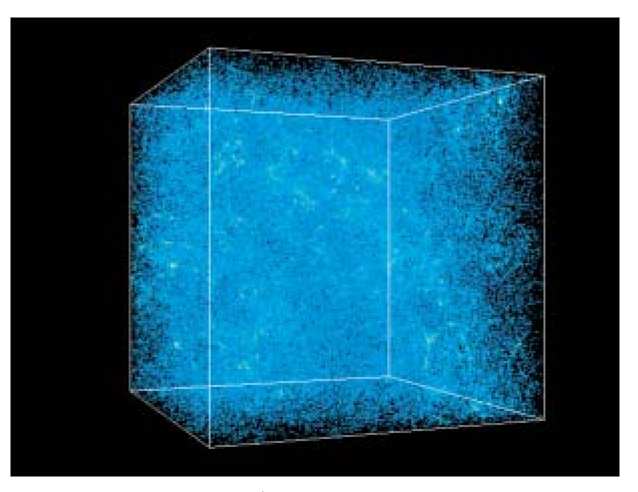
BRYAN CHRISTIE DESIGN; FUENTE: ESTUDIO DIGITAL SLOAN DE LOS CIELOS

CONSTRUCCION DE UN UNIVERSO

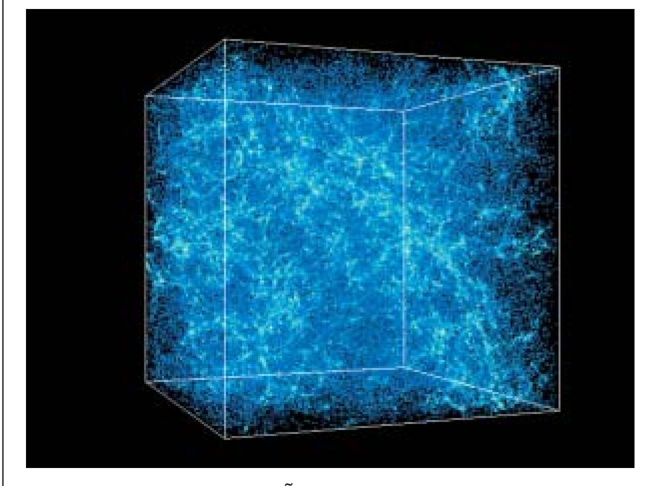
MEDIANTE SIMULACIONES INFORMATICAS se relaciona el estado actual de agregación de la materia (descrito por el proyecto Sloan y otros trabajos cartográficos) con el correspondiente al universo arcaico (que se manifiesta en la radiación del fondo cósmico de microondas). Cada cuadro corresponde a un momento de la expansión subsiguiente a la gran explosión. Dado que el universo se expande, los cuadros no están a escala: el primero tiene unos cinco millones de años luz de diámetro, y el último, unos 140 millones de años luz. Los puntos representan materia. La simulación se realizó en el Centro Nacional de Aplicaciones de la Supercomputación de los EE.UU. (La película completa está disponible en cfcp.uchicago.edu/lss/filaments.html).



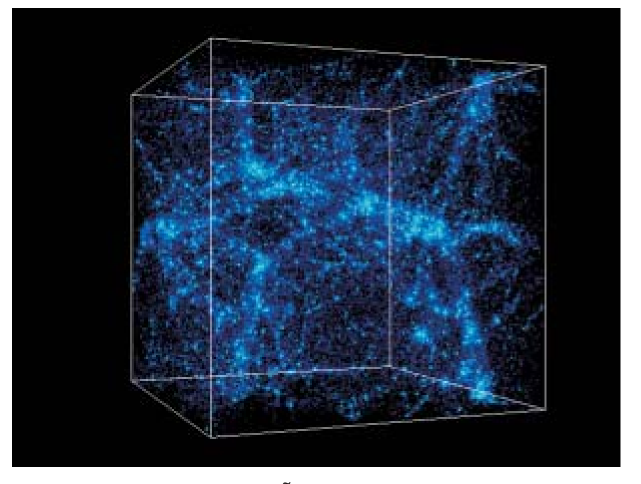
120 MILLONES DE AÑOS: Con anterioridad, la materia se extendía como si fuera un mar casi uniforme, con ligeras ondulaciones.



490 MILLONES DE AÑOS: Las regiones densas adquieren material a expensas de las menos densas. Se forman las primeras galaxias.



1200 MILLONES DE AÑOS: Con el tiempo, la gravitación concentró la materia en vastos filamentos y hojas, y dejó vacíos los huecos que los separan.



13.700 MILLONES DE AÑOS (ACTUALIDAD): El crecimiento de grandes estructura ha cesado, porque la aceleración cósmica contrarresta el proceso de agregación.

ANDREY KRAVTSOV *Universidad de Chicago* Y ANATOLY KLYPIN *Universidad estatal de Nuevo México*

de onda. El ecualizador gráfico de un equipo doméstico de sonido ofrece ese análisis: indica la intensidad de los bajos (cuya longitud de onda es grande), la de los agudos (de pequeña longitud de onda) y la de diversos segmentos intermedios del espectro acústico. Quienes tienen oído distinguirán con facilidad en el sonido de la orquesta la flauta dulce del trombón. Los cosmólogos hacen otro tanto con la distribución de galaxias. La cantidad relativa de estructura en las escalas grandes y en las pequeñas constituye una eficaz sonda cosmológica.

El espectro de potencia ha sido medido por el equipo 2dF y por el proyecto SDSS con resultados concordantes. Lo primero que ha de señalarse es que las fluctuaciones se debilitan al aumentar la escala (*véase el recuadro* “La distribución global de estructuras cósmicas”). Esa debilidad de las fluctuaciones indica que la distribución de galaxias es casi homogénea, como requiere el principio cosmológico de Einstein.

En segundo lugar, el espectro de potencia, al ser representado en una escala logarítmica, no sigue una línea recta. Esta desviación de la recta viene a confirmar que la dinámica

del universo ha cambiado con el tiempo. Otras observaciones han llegado a la conclusión de que la densidad de energía del universo está dominada por la materia y por un componente misterioso, o energía oscura. Los fotones, mermada su energía por la expansión cósmica, son despreciables. Sin embargo, una extrapolación retrógrada arroja que los fotones dominaban cuando el universo tenía menos de 75.000 años de edad. En esa época, la gravedad no podía conseguir que las fluctuaciones aumentasen con el tiempo, como está ocurriendo ahora. De ahí que el espectro de potencia ofrezca un comportamiento diferente en las escalas muy grandes (mayores de unos 1200 millones de años luz).

La escala exacta donde se produce esa desviación mide la densidad total de materia en el universo; el resultado, unos $2{,}5 \times 10^{-27}$ kilogramos por metro cúbico de espacio, concuerda con el valor obtenido en otras mediciones. Por último, la combinación de estos resultados induce a pensar que toda la materia oscura es de la variedad fría. La materia oscura caliente suavizaría las fluctuaciones de la distribución de galaxias a escalas menores, hecho que no ha sido observado.

Las fluctuaciones que hemos descubierto en la distribución de galaxias a grandes escalas deberían ser una mera amplificación de las fluctuaciones del universo primigenio. Estas se manifiestan aún en las fluctuaciones del FCM. Es posible, por lo tanto, compararlas con los espectros de potencia galácticos. Resulta asombroso, pero ambos métodos proporcionan resultados coincidentes. La densidad de galaxias fluctúa en torno a una parte en 10 en las escalas cercanas a los 1000 millones de años luz. El FCM presenta fluctuaciones de una parte en cien mil; cuando se las extrapola hasta el presente, se encuentran en admirable concordancia con aquéllas. Ello nos anima a confiar en la validez de la idea que nos hacemos de la historia del cosmos, con la gran explosión, la inestabilidad gravitatoria y sus secuelas.

El futuro del estudio de las grandes estructuras

El sondeo digital SDSS primario escruta la estructura del cosmos a escalas que van desde los 100 millones de años luz hasta más de los 1000 millones. Con el fin de explorar escalas todavía mayores, cuenta con una segunda muestra auxiliar, compuesta por galaxias de una luminosidad excepcional, que se extiende hasta más de 5000 millones de años luz. Para el estudio a escalas menores se recurre a una tercera muestra, que examina las líneas de absorción de cuásares distantes; su luz atraviesa una densa red de nubes de hidrógeno gaseoso que aún no se habían convertido en galaxias.

Con todos estos datos, se procura estrechar la conexión entre las estructuras cósmicas (de un pasado no muy remoto) y el FCM (que permite sondear las estructuras del universo arcaico). El espectro de potencia del FCM exhibe una serie de jorobas características, reflejo de las cantidades relativas de materia oscura y de materia ordinaria. Se confía en poder hallar las jorobas correspondientes en el espectro de potencia actual; de ser así, se tendría una prueba más de que las fluctuaciones hoy percibidas evolucionaron a partir de las observadas en el universo primigenio.

Otra forma de rastrear el desarrollo de estructuras a lo largo del tiempo consiste en sondear la distribución de galaxias más distantes, pues mirar a grandes distancias equivale a remontarse en el tiempo. La materia oscura no debía de haberse agregado mucho en aquella época; la inestabilidad gravitatoria no había tenido apenas tiempo para actuar. Pero exploraciones efectuadas con el gran telescopio del Observatorio Austral Europeo en Chile y por el Observatorio Keck de Hawai dejan ver que las galaxias muy lejanas se encuentran igual de apiñadas que hoy; se organizan en las mismas estructuras filiformes y espumosas que las galaxias cercanas. Es extraño. A diferencia de las galaxias modernas, que siguen a la materia oscura, estas galaxias primitivas se hallan mucho más apiñadas que la materia oscura subyacente. Constituye un indicio importante sobre el modo en que se formaron las galaxias.

No falta mucho para lograr una comprensión completa del desarrollo de la estructura del cosmos, desde las ondulaciones en el plasma primordial hasta los brillante cúmulos galácticos del universo moderno. Dicho esto, hay tarea para los años venideros. ¿Qué mecanismo suscitó las fluctuaciones iniciales del fondo de microondas? ¿Cuál, el modo exacto en que se formaron las galaxias? ¿A qué se deben sus propiedades? ¿Pudo haber sido de otro modo? ¿Sería concebible un universo cuyas fluctuaciones empezasen teniendo amplitudes mucho mayores o mucho menores? He aquí algunas de las grandes cuestiones que tal vez ilusionen a un estudiante y le impulsen a investigarlas un día.

El autor

Michael A. Strauss es portavoz y "vicecientífico de proyecto" del Estudio Digital Sloan de los Cielos, que se propone realizar un mapa completo de una cuadrante del firmamento. Se doctoró en física en la Universidad de California en Berkeley y realizó trabajos posdoctorales en el Instituto de Tecnología de California y en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton; en la actualidad es profesor de la Universidad de Princeton.

Bibliografía complementaria

COSMOLOGY: THE SCIENCE OF THE UNIVERSE. Segunda edición. Edward Harrison. Cambridge University Press, 2000.

THE 2DF GALAXY REDSHIFT SURVEY: THE POWER SPECTRUM AND THE MATTER CONTENT OF THE UNIVERSE. Will J. Percival et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 327, n.º 4, págs. 1297-1306; noviembre de 2001.

FROM HERE TO ETERNITY. Valerie Jamieson en *New Scientist*, vol. 180, n.º 2422, págs. 36-39; 22 de noviembre de 2003.

THE THREE-DIMENSIONAL POWER SPECTRUM OF GALAXIES FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY. Max Tegmark et al. en *Astrophysical Journal* (en prensa).

Cuando la aceleración cambió de signo

Las supernovas revelan el momento crucial en que la expansión del universo pasó de decelerada a acelerada

Adam G. Riess y Michael S. Turner

Desde los tiempos de Isaac Newton hasta las postrimerías del siglo XX, la propiedad definitoria de la gravitación fue su naturaleza atractiva. La gravedad nos mantiene pegados al suelo. Frena y detiene el ascenso de una bala y mantiene a la Luna en órbita en torno a la Tierra. Impide que nuestro sistema solar se desmantele y aglutina enormes cúmulos de galaxias. Aunque la teoría einsteiniana de la relatividad general admite que la gravedad sea no sólo atractiva sino también repulsiva, casi todos los físicos han considerado que se trataba de una mera posibilidad teórica, irrelevante en el universo actual. Hasta hace poco, se tenía plena confianza en que la gravedad frenaría la expansión del cosmos.

Pero en 1998 se descubrió la faceta repulsiva de la gravedad. La observación detallada de supernovas remotas (las supernovas son explosiones estelares que durante un efímero período fulguran con un brillo de diez mil millones de soles) halló que lucían más débilmente de lo esperado. La luz de esas supernovas, que hicieron explosión hace miles de millones de años, hubo de viajar una distancia mayor de la pronosticada por la teoría. Es la explicación más verosímil. Y esta explicación, a su vez, llevó a la conclusión de que la expansión del universo se acelera, en vez de frenarse. Tan radical fue este descubrimiento, que no faltaron cosmólogos que propusieran que la pérdida de brillo de las supernovas debíase a otros efectos, como la interposición de polvo intergaláctico, que atenuaría la luz. Pero el estudio de supernovas todavía más remotas ha consolidado la tesis de la aceleración cósmica.

Ahora bien, ¿ha estado la expansión cósmica acelerándose durante toda la vida del universo, o se trata, por el contrario, de un acontecimiento reciente, de los últimos cinco mil millones de años? La respuesta tiene profundas implicaciones, pues si se descubriera que la expansión del universo siempre se ha estado acelerando, habría que revisar por entero la evolución cósmica. Por el contrario, si como predicen los cosmólogos, la aceleración fuera un fenómeno reciente, tal vez cupiese determinar su causa (y quizás averiguar el destino del universo) estableciendo cuándo y cómo empezó la expansión del universo a ganar velocidad.

Batalla de titanes

Hace unos 75 años, Edwin Hubble descubrió la expansión del universo al advertir que otras galaxias se alejaban de la nuestra. Observó que las más distantes se separaban más deprisa que las cercanas, de acuerdo con la ahora llamada "ley de Hubble" (la velocidad relativa es igual a la distancia multiplicada por la constante de Hubble). Tomada en el contexto de la teoría de la relatividad general, la ley resulta de la expansión uniforme del espacio, mera dilatación o cambio de escala del tamaño del universo (*véase el recuadro* "Espacio en expansión").

En la teoría de Einstein, la gravitación con carácter de fuerza atractiva sigue siendo válida, incluso a escala cósmica, para todas las formas conocidas de materia y energía. En consecuencia, la relatividad general pronostica que la expansión del universo debería ir haciéndose más lenta, a un ritmo determinado por la densidad de materia y energía que alberga. Pero la relatividad general también admite que pueda haber formas de energía con propiedades extrañas, que producirían gravitación repulsiva (*véase el recuadro* "¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?). El descubrimiento de una expansión que en lugar de irse frenando se acelera parece haber revelado la presencia de "energía oscura".



LA MEDICION DE DISTANCIAS en el universo se basa en las supernovas de tipo Ia.

DAVID EMMITE (*fotografía*)

La ralentización o la aceleración de la expansión es el resultado de una batalla entre dos titanes: el tirón gravitatorio, atractivo, de la materia y el empuje, gravitatorio también, pero repulsivo, de la energía oscura. En esta disputa, lo que verdaderamente importa son las densidades de aquélla y de ésta. La densidad de materia disminuye al expandirse el universo, porque aumenta el volumen de espacio. (Sólo una pequeña fracción de la materia se encuentra en forma de estrellas luminosas; se cree que el grueso consiste en materia oscura, que no interacciona de forma apreciable ni con la materia ordinaria ni con la luz, pero posee gravedad atractiva.) Aunque es poco lo que se sabe respecto de la energía oscura, se cree que su densidad varía de un modo paulatino, o incluso que no lo hace en absoluto, a medida que se expande el universo. La densidad de energía oscura es, en este momento, mayor que la densidad de materia, pero en un pasado remoto debió de ser al contrario: en aquel entonces, la expansión del universo se habría estado decelerando (*véase el recuadro* "El punto de transición").

Existen también otras razones para esperar que la expansión del universo no se haya estado acelerando siempre. Si no hubiera dejado nunca de acelerarse, no se podría explicar la existencia de las estructuras cósmicas observadas en el universo actual. De acuerdo con las teorías cosmológicas, las galaxias, los cúmulos galácticos y otras estructuras todavía mayores evolucionaron a partir de pequeñas inhomogeneidades de la densidad de materia del universo primitivo, que hoy se manifiestan en las fluctuaciones de la temperatura de la radiación cósmica de fondo en la banda de microondas (FCM, Fondo Cósmico de Microondas). La mayor intensidad de la gravitación atractiva de las regiones hiperdensas de materia detuvo su expansión y permitió que se convirtieran en objetos ligados por la gravedad, de galaxias como la nuestra a los grandes cúmulos galácticos. Pero si la expansión del universo se hubiera estado acelerando siempre, habría ido descomponiendo las estructuras antes de que terminaran de constituirse. Además, con una expansión siempre acelerada, dos aspectos esenciales del protouniverso —las pautas de variaciones del FCM y las abundancias de elementos ligeros producidos a los pocos segundos de la gran explosión— no concordarían con las observaciones de hoy.

No obstante, deben buscarse pruebas directas de una fase anterior de expansión decelerada. Contribuirían a confirmar el modelo cosmológico estándar y darían pistas sobre la causa del período actual de expansión cósmica acelerada. Dado que los telescopios retrogradan en el tiempo al buscar luz procedente de estrellas o galaxias muy alejadas, cuando se enfocan objetos remotos se estudia la historia de la expansión del universo, codificada en la relación entre las distancias y las velocidades de recesión de las galaxias. Si la expansión se estuviera decelerando, la velocidad de una galaxia distante sería mayor que la pronosticada por la ley de Hubble; menor, en caso contrario. O expresado de otro modo: si el universo se acelerase, las galaxias que tuvieran una determinada velocidad de recesión se hallarían más aleja-

das de lo previsto, y por ende su luz sería más tenue.

A la busca de supernovas

Para sacar provecho de este fenómeno simple, hay que hallar objetos astronómicos que posean una luminosidad intrínseca conocida (la cantidad de radiación que producen por segundo) y puedan ser vistos en una parte del universo muy alejada. Una clase particular de supernovas, las del tipo Ia, resultan adecuadas a tal fin. Estas explosiones estelares son tan brillantes, que los telescopios terrestres pueden observarlas aun cuando se hallen a mitad del universo visible; el telescopio espacial Hubble, a mayor distancia todavía. La luminosidad intrínseca de las supernovas de tipo Ia se ha calibrado con precisión a lo largo de los últimos años; la distancia que hay hasta una de ellas puede, pues, determinarse por su brillo aparente.

El corrimiento hacia el rojo de la luz que nos llega de su galaxia da la velocidad de recesión de una supernova. La radiación procedente de objetos en recesión exhibe un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas; por ejemplo, la longitud de onda de la luz emitida cuando el universo tenía la mitad del tamaño actual se duplicará y tornará más roja. Calibrando el corrimiento al rojo y el brillo aparente de un gran número de supernovas situadas a diferentes distancias resulta posible la creación de un registro de la expansión del universo.

Por desdicha, las supernovas de tipo Ia son raras; en una galaxia como la Vía Láctea sólo aparecen una vez cada dos o tres siglos, por término medio. La técnica utilizada por los cazadores de supernovas consiste en observar repetidamente una parcela del firmamento que contenga millares de galaxias para cotejar, luego, las imágenes obtenidas. Un punto de luz transitorio, que fuese visible en una imagen pero no en la anterior, podría ser una supernova. Los resultados que en 1998 dieron indicios de la aceleración cósmica se basaron en las observaciones de dos equipos; examinaban supernovas que detonaron cuando el tamaño del universo era unos dos tercios del actual, hará unos cinco mil millones de años.

No faltaron quienes se preguntasen si los equipos habían interpretado correctamente los datos de las supernovas. ¿No cabría la posibilidad de que otros efectos, sin relación con la aceleración cósmica, pudieran ser la causa de que el brillo de las supernovas fuese menor del esperado? También el polvo que llena el espacio intergaláctico podría haber debilitado la luz de supernovas. Cabía incluso la posibilidad de que las supernovas antiguas fueran más débiles desde su nacimiento: la composición química del universo habría sido entonces, por lo tanto, diferente de la actual y menor la abundancia de los elementos pesados producidos por las reacciones nucleares en las estrellas.

Felizmente, se dispone de cotejos que discriminan bien entre estas hipótesis. Si las supernovas ofreciesen un brillo menor del esperado por una causa astrofísica —una ubicua pantalla de polvo o una menor intensidad de las supernovas en el pasado—, el efecto atenuador debería acentuarse con el corrimiento al rojo. En cambio, si la atenuación fuese resultado de una aceleración cósmica reciente, subsiguiente a una era de deceleración, las supernovas ocurridas en ésta parecerían más brillantes de lo que les correspondería según las otras hipótesis. Por consiguiente, la observación de supernovas que hicieran explosión cuando el tamaño del universo era de menos de dos tercios de su tamaño actual proporcionaría datos para saber por cuál de las hipótesis hay que inclinarse. (Es posible, claro está, que un efecto astrofísico desconocido imitara a la perfección los respectivos efectos de la aceleración y la deceleración, pero las explicaciones artificialmente ajustadas no suelen tener buena acogida.)

Una tarea ardua

Mas el hallazgo de estas supernovas antiguas y distantes es dificultoso. Una supernova de tipo Ia que detonó cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual presenta un brillo aparente unas 10.000 millones de veces más débil que Sirio, la estrella más brillante del firmamento. Los telescopios instalados en tierra no pueden detectar fiablemente tales objetos, pero el telescopio Hubble, desde el espacio, sí.

Uno de los autores (Riess) anunció en 2001 que el telescopio espacial había obtenido por un feliz azar varias imágenes de una supernova de tipo Ia sumamente distante (SN 1997ff). En vista del corrimiento al rojo de la luz de esta explosión estelar, que ocurrió hace unos 10 mil millones de años, cuando el universo tenía la tercera parte de su tamaño actual, el objeto mostraba un brillo mucho mayor del que hubiera ofrecido de ser cierta la hipótesis del universo polvoriento. Este resultado constituyó la primera prueba directa de la época en que hubo deceleración. Sostuvimos los autores de este artículo que la observación de supernovas que exhibieran corrimientos al rojo muy elevados podría zanjar la cuestión y dataría con precisión la transición de la ralentización a la aceleración.

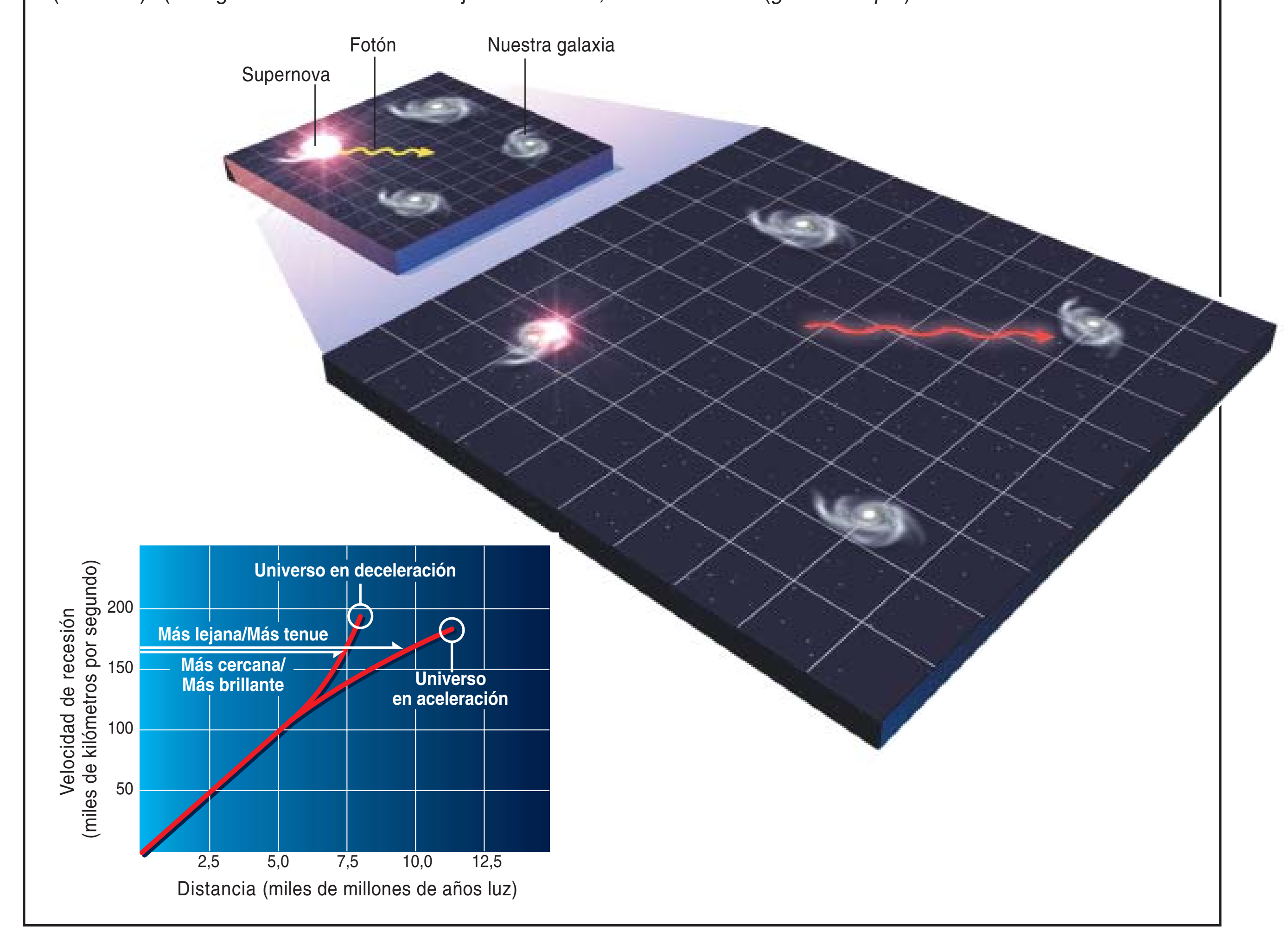
La Cámara Avanzada de Sondeo, un nuevo instrumento de obtención de imágenes instalado en el telescopio espacial en 2002, ha convertido al Hubble en un buscador de supernovas. Riess dirigió la obtención de una muestra, tan necesaria, de supernovas remotas de tipo Ia. Se basó para ello en el Sondeo

Resumen/Expansión cósmica

- En 1998, las observaciones de unas supernovas distantes indicaron que la expansión del universo se está acelerando. Desde aquella fecha, se han acumulado las pruebas que lo ratifican.
- El estudio de supernovas cada vez más remotas ha proporcionado pruebas de que la expansión se deceleró antes de acelerarse, tal y como pronosticaba la cosmología.
- La determinación del momento en que la expansión pasó de la deceleración a la aceleración podría revelar la naturaleza de la energía oscura y hacernos saber la suerte que finalmente correrá nuestro universo.

ESPACIO EN EXPANSION

SUPONGAMOS QUE UNA SUPERNOVA hiciera explosión en una galaxia muy alejada, cuando el universo tenía un tamaño mitad del actual (*izquierda*). Al llegar la radiación emitida por la explosión a nuestra galaxia, su longitud de onda se habría duplicado, desplazando la luz hacia el extremo rojo del espectro (*derecha*). (Las galaxias no se han dibujado a escala; la distancia que las separa sería en realidad mucho mayor que la ilustrada.) Si la expansión del universo se estuviera decelerando, las supernovas se encontrarían más cercanas a nosotros y su brillo aparente sería mayor de lo esperado; si la expansión se acelerase, se hallarían a mayor distancia y las veríamos más tenues (*gráfico al pie*).



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Profundo de los Orígenes por los Grandes Observatorios. El equipo halló seis que hicieron explosión cuando el universo tenía menos de la mitad de su tamaño actual (hace más de 7000 millones de años): junto con la SN 1977ff, se trata de las más antiguas supernovas de tipo Ia descubiertas. Confirman la existencia de un período primitivo de deceleración y sitúan el punto muerto de transición entre deceleración y aceleración hace unos 5000 millones de años. Este hallazgo concuerda con las expectativas teóricas y reafirma a los cosmólogos. La aceleración cósmica llegó por sorpresa y supuso un nuevo problema que debía resolverse. Pero no nos ha obligado a remozar una parte demasiado grande de lo que ya creíamos saber sobre el universo.

Nuestro destino cósmico

Las supernovas arcaicas proporcionaron también nuevos indicios de la energía oscura, causa implícita de la aceleración cósmica. La candidata principal para explicar los efectos de la energía oscura es la energía del vacío, matemáticamente equivalente a la constante cosmológica que Einstein concibió en 1917. Dado que Einstein consideró que su modelo de universo debía ser estático, "apañó las cuentas" con ese factor cosmológico que compensaba la gravitación atractiva de la materia. Para lograr ese estatismo, la densidad asociada a la constante tenía que valer la mitad de la densidad de materia. Mas para producir la aceleración observada del universo, ha de duplicarla.

¿De dónde podría venir esta densidad energética? El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica exige que el vacío esté lleno de partículas que viven merced a un "préstamo" de tiempo y de energía, cobran existencia sin cesar y

¿Cómo es posible que haya repulsión gravitatoria?

EN LA TEORIA DE NEWTON, la gravedad es siempre atractiva y su intensidad, proporcional a la masa del objeto atrayente. Según la teoría de Einstein, la intensidad de la fuerza de atracción ejercida por un objeto depende también de su composición. En física, la composición de una sustancia se caracteriza por su presión interna. La gravedad de un objeto es proporcional a la suma de su densidad de energía y el triple de su presión interna. El Sol, por ejemplo, es una esfera de gas caliente con presión positiva (dirigida hacia el exterior); dado que la presión del gas se eleva con la temperatura, la atracción gravitatoria del Sol resulta un poco mayor que la de una bola de materia fría de masa equivalente. Por otra parte, un gas de fotones tiene una presión igual a la tercera parte de su densidad energética, por lo que su atracción gravitatoria doblaría la de una masa equivalente de materia fría.

La energía oscura se caracteriza por su presión negativa. (Los objetos elásticos —una lámina de goma estirada, por ejemplo— tienen también presión negativa, es decir, hacia su interior). Si su presión alcanza un valor inferior a $-1/3$ de la densidad de energía, la suma de la energía y tres veces la presión será negativa: se tendrá una fuerza gravitatoria repulsiva. La presión del vacío cuántico vale –1 veces su densidad de energía: la gravedad de un vacío es muy repulsiva. Otras formas hipotéticas de energía oscura tienen una presión que se encuentra entre $-1/3$ y –1 veces su densidad de energía. Se ha recurrido a algunos de estos tipos de energía con el fin de explicar la época inflacionaria, un período de aceleración cósmica muy temprano. Otros tipos podrían corresponder a la energía oscura que alimenta la aceleración observada hoy.

desaparecen casi en el acto. Pero cuando se calcula la densidad de energía asociada al vacío cuántico, se obtienen valores demasiado abultados: sobran 55 órdenes de magnitud. Si el valor de la energía del vacío fuera tal, toda la materia del universo habría salido disparada instantáneamente y las galaxias no hubieran llegado a formarse jamás.

Se ha dicho que no hay discrepancia más embarazosa en toda la física teórica. Pero tal vez suponga una gran oportunidad. Aunque es posible que nuevas tentativas de estimación de la densidad de energía del vacío produzcan la cantidad exacta que explica la aceleración cósmica, muchos están convencidos de que un cálculo correcto, que incorpore un nuevo principio de simetría, llevará a la conclusión de que la energía asociada con el vacío cuántico es cero (la nada cósmica no pesaría). En tal caso, tendría que intervenir otra causa para que la expansión del universo se esté acelerando.

Se han propuesto múltiples ideas, que van de la influencia de dimensiones extra, ocultas, hasta la energía asociada con un nuevo campo de la naturaleza, a veces llamado "quintaesencia" [*véase* "Salir de la oscuridad", por George Dvali, *en este mismo número*]. En general, estas hipótesis postulan una densidad de energía oscura que no es constante: por lo común, decrece conforme se expande el universo (pero también se ha propuesto que aumenta). Tal vez la idea más radical consista en que la energía oscura no existe en absoluto y que, por lo tanto, es preciso modificar la teoría de la gravitación de Einstein.

Dado que la forma en que varía la energía oscura depende del modelo teórico, cada teoría pronostica un momento diferente para el punto de transición en que el universo pasó de la ralentización a la aceleración. Si la densidad de energía oscura disminuyera al expandirse el universo, el punto de inversión se anticiparía en el tiempo al correspondiente a un modelo que supusiera una densidad constante de la energía oscura. Incluso los modelos teóricos que modifican la gravedad dejan su impronta en el tiempo en que se produce el cambio. Los últimos resultados sobre supernovas concuerdan con las teorías que postulan una densidad constante de energía oscura, pero también son compatibles con la mayoría de los modelos que suponen su variabilidad. Tan sólo quedan descartadas aquellas teorías que estipulan grandes variaciones en la densidad de la energía oscura.

Investigación abierta

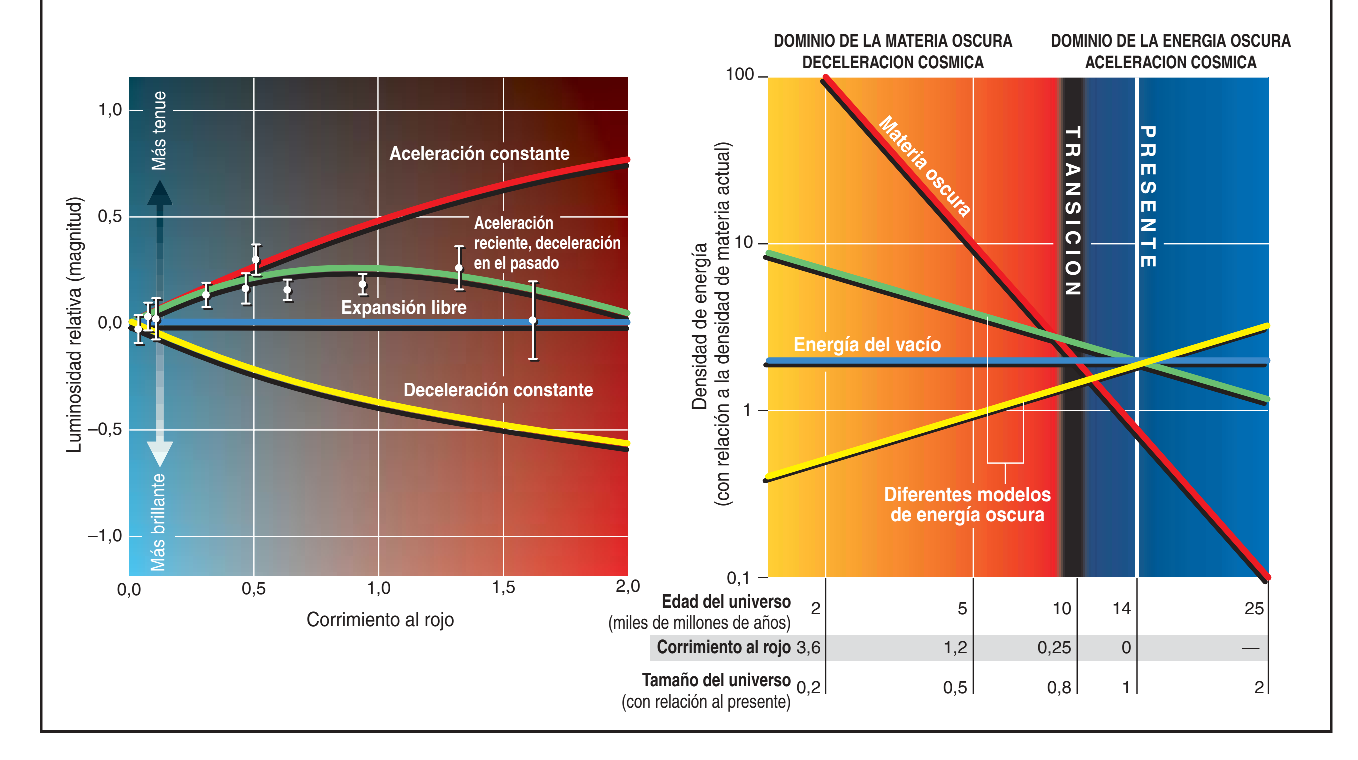
Con el fin de cerrar el abanico de posibilidades teóricas, el telescopio espacial Hubble continúa recogiendo datos de supernovas que pudieran precisar los detalles de la fase de transición. A pesar de que el telescopio espacial sigue siendo el único medio para calar en la historia antigua de la expansión cósmica, hay más de media docena de programas que persiguen medir, gracias a instrumentos instalados en tierra, la aceleración cósmica reciente con precisión suficiente para descubrir la física de la energía oscura.

El proyecto más ambicioso es la Misión Conjunta de la Energía Oscura, del Departamento de Energía de los EE.UU. y la NASA. Utilizaría un telescopio espacial de gran angular, con un espejo de dos metros, dedicado al descubrimiento y medición precisa de millares de supernovas de tipo Ia. Los cazadores de supernovas confían en tener en marcha el instrumento en los primeros años del próximo decenio; hasta entonces, para detectar las explosiones estelares más distantes dependerán del telescopio Hubble. [Los planes anunciados por el presidente Bush de reanudar la exploración de la Luna con misiones tripuladas han modificado la programación de la NASA. Se ha retirado la misión conjunta de sus últimas previsiones presupuestarias quinquenales. Según fuentes oficiales, no debe entenderse como una suspensión definitiva. Parece, eso sí, que el departamento de energía sigue interesado. Por otra parte, la NASA ha anunciado también la suspensión de la Misión de Servicio IV, que debería haber efectuado trabajos de mantenimiento en el Hubble en 2006. Se esperaba que el telescopio espacial siguiese funcionando hasta 2010; sin esas reparaciones, no es probable que dure tanto.]

La solución del misterio de la aceleración cósmica nos revelará también el destino de nuestro universo.

EL PUNTO DE TRANSICION

OBSERVACIONES RECIENTES de supernovas muy distantes indican que la expansión del universo se estuvo decelerando antes de que empezara a acelerarse (*gráfico de la izquierda*). Se ha descubierto que las supernovas con corrimientos al rojo mayores de 0,6 eran más brillantes de lo que sería de esperar si el universo se hubiera estado acelerando siempre o si el polvo intergaláctico hubiese atenuando su luz. (Cada punto corresponde a un promedio de supernovas con un corrimiento al rojo parecido.) Los resultados revelan que el punto de transición entre la deceleración y la aceleración debió acontecer hace unos 5000 millones de años. Si se lograse establecer con mayor precisión este punto de transición quizá se podría entender de qué forma ha evolucionado la energía oscura a lo largo del tiempo y quién sabe si descubrir su naturaleza (*a la derecha*).



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Si la energía oscura es constante, o si aumenta con el tiempo, dentro de unos cien mil millones de años todas las galaxias, salvo unas pocas, tendrán un corrimiento al rojo demasiado grande para poder ser vistas. Pero si la densidad de energía oscura disminuye y la materia vuelve a dominar, nuestro horizonte cósmico crecerá y revelará una parte mayor del universo. También son posibles futuros más extremos (y letales). Si la energía oscura se eleva, en lugar de decaer, el universo acabará experimentando una "hiperaceleración" que haría trizas sucesivamente galaxias, sistemas solares, planetas y núcleos atómicos, en ese orden. También podría suceder que el universo se volviese a colapsar si la energía oscura llegara a ser negativa. La única forma de pronosticar el futuro cósmico es averiguar la naturaleza de la energía oscura.

Los autores

Adam G. Riess y **Michael S. Turner** son figuras destacadas en la investigación de la historia de la expansión del universo. Riess es astrónomo asociado del Instituto Científico del Telescopio Espacial y profesor adjunto asociado de física y de astronomía de la Universidad Johns Hopkins. Fue el autor principal del estudio publicado por el Equipo de Supernovas de z elevado en 1998 que anunció el descubrimiento de un universo en aceleración. Turner, que ostenta la cátedra Rauner de la Universidad de Chicago, desempeña el cargo de director ayudante de ciencias físico-matemáticas de la Fundación Nacional de Ciencias de los EE.UU. Un artículo suyo de 1995, en coautoría con Lawrence M. Krauss, pronosticó la aceleración cósmica. Se le debe la expresión "energía oscura".

Bibliografía complementaria

DO TYPE IA SUPERNOVAE PROVIDE DIRECT EVIDENCE FOR PAST DECELERATION IN THE UNIVERSE? Michael S. Turner y Adam G. Riess en *Astrophysical Journal*, vol. 569, parte 1, páginas 18-22; 10 de abril de 2002.

THE EXTRAVAGANT UNIVERSE: EXPLODING STARS, DARK ENERGY AND THE ACCELERATING COSMOS. Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002.

TYPE IA SUPERNOVA DISCOVERIES AT Z > 1 FROM THE HUBBLE SPACE TELESCOPE. Adam G. Riess *et al.* Disponible en **es.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0402/0402512.pdf**.

IS COSMIC SPEED-UP DUE TO NEW GRAVITATIONAL PHYSICS? Sean M. Caroll, Vikram Duvvuri, Mark Trodden y Michael S. Turner en *Physical Review Letters* (en prensa).

Salir de la oscuridad

Puede que la aceleración cósmica no la cause una energía oscura, sino un inexorable flujo de gravedad que escapa de nuestro mundo

Georgi Dvali

Pocas veces se han sentido tan confusos los cosmólogos y los físicos de partículas. Aunque recientes observaciones han confirmado nuestro modelo estándar de la cosmología, todavía queda un interrogante abierto: ¿por qué la expansión del universo se acelera? Si se tira una piedra hacia arriba, la atracción de la gravedad de la Tierra la frenará; no se acelerará alejándose del planeta. Del mismo modo, las galaxias lejanas, impulsadas por la expansión subsiguiente a la gran explosión, deberían atraerse unas a otras y frenarse. Y, sin embargo, se separan cada vez con más rapidez. Por lo general, se atribuye la aceleración a una misteriosa energía oscura, pero poco más puede añadirle la física a esa etiqueta. Lo único que va quedando claro es que, a las mayores distancias que llegamos a observar, la gravedad actúa de manera extraña y se convierte en una fuerza repulsiva.

Las leyes de la física establecen que la gravedad proviene de la materia y la energía; atribuyen una clase extraña de gravedad a una extraña clase de materia o energía. De ahí que se hable de energía oscura. Pero quizá deban cambiarse las leyes mismas. Los físicos cuentan con un precedente de un cambio tal: la ley de la gravitación de Newton del siglo XVII, que tenía varias limitaciones conceptuales y experimentales, dejó paso a la teoría general de la relatividad de Einstein en 1915. La relatividad también tiene sus limitaciones; en particular, cuando se aplica dicha fuerza a distancias muy cortas, que corresponden al dominio de la mecánica cuántica. De modo parecido a como la relatividad englobó la física de Newton, una teoría cuántica de la gravedad incluiría finalmente la relatividad.

Con el paso de los años, se han encontrado algunos enfoques plausibles para la gravedad cuántica, el más prominente de los cuales es la teoría de cuerdas. Cuando la gravedad opera a distancias microscópicas —por ejemplo, en el centro de un agujero negro, donde una masa enorme se concentra en un volumen subatómico—, las propiedades cuánticas de la materia entran en juego; la teoría de cuerdas describe cómo cambia entonces la ley de la gravedad.

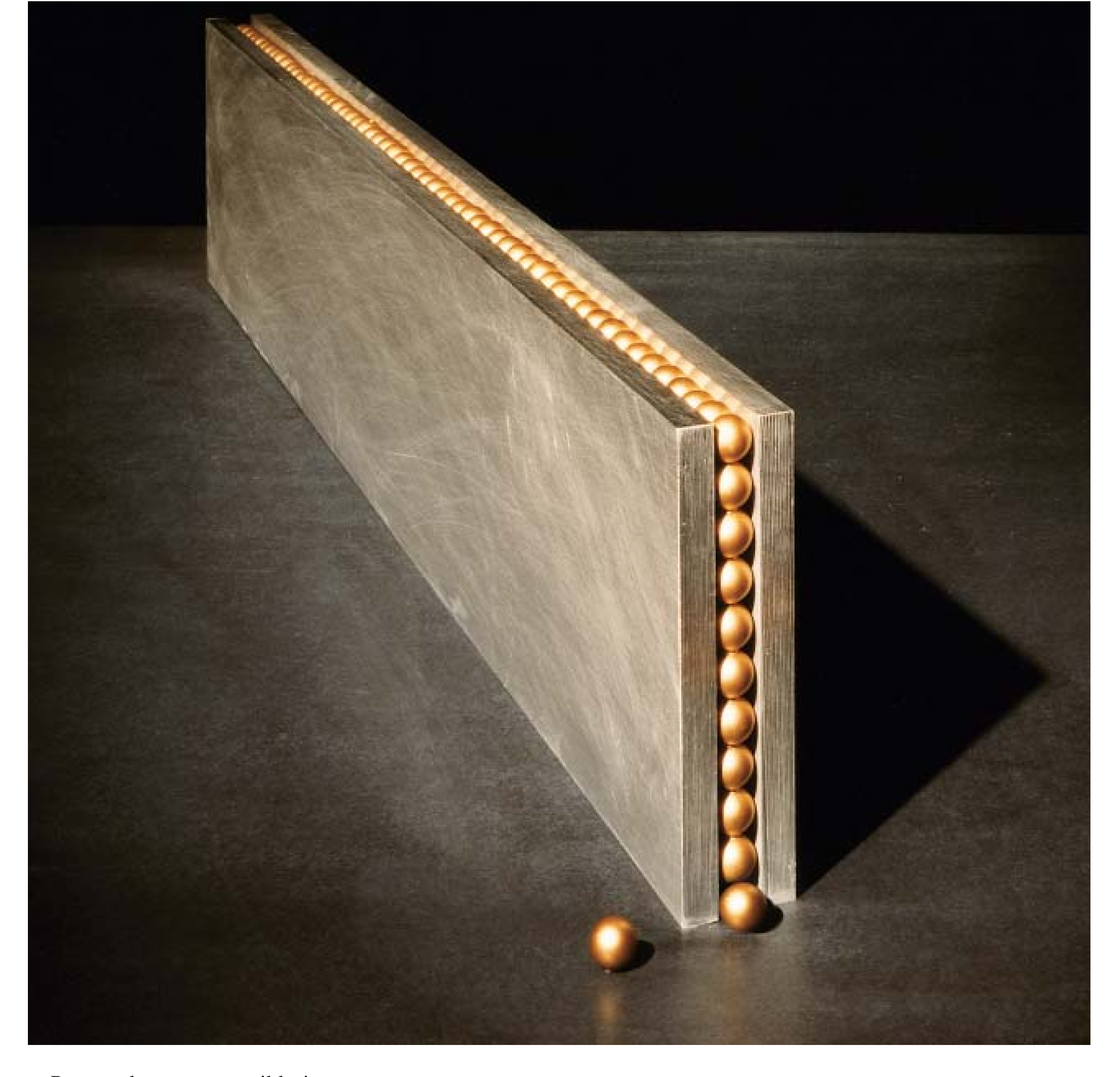
A distancias mayores, los teóricos de las cuerdas asumen por lo general que los efectos cuánticos no cuentan. Mas los descubrimientos cosmológicos de los últimos años les azuzan; han de volver sobre la cuestión. Hace cuatro, algunos nos preguntamos si la teoría de cuerdas modificaría la ley de la gravedad, no sólo en las escalas pequeñas, sino también en las grandes. Una de sus particularidades podría tener ese efecto: sus dimensiones añadidas, o direcciones adicionales en que se pueden mover las partículas. Agrega seis o siete a las tres dimensiones usuales.

Antes, se aducía que las dimensiones adicionales eran demasiado pequeñas para que se las pudiera ver o mover por ellas. Pero recientes progresos ponen de manifiesto que algunas de las nuevas dimensiones, o todas, podrían tener una extensión infinita. Se nos ocultarían, no porque fueran demasiado pequeñas, sino porque las partículas que constituyen nuestros cuerpos están atrapadas en las tres dimensiones ordinarias. Sólo el gravitón, la partícula que transmite la fuerza gravitatoria, eludiría el confinamiento. Esa fuga cambiaría la ley de la gravedad.

Quintaesencia aun sin nada

Cuando los astrónomos toparon con la aceleración cósmica, su primera reacción fue atribuirla a la llamada constante cosmológica. Este término de las ecuaciones de la relatividad general, de mala fama por haberlo introducido Einstein para retractarse después, representa la energía inherente al espacio mismo. Un volumen de espacio completamente vacío, carente de materia en absoluto, aún contendría esa energía, equivalente más o menos a 10^{-26} kilogramos por metro cúbico. Aunque la constante cosmológica encaja bien con todos los datos que tenemos hasta el momento, muchos la consideran insatisfactoria. El problema es su inexplicable pequeñez. Resulta tan diminuta, que tendría un efecto pequeño en la mayor parte de la historia cósmica, incluido el período en que el universo fue formándose. Pero presenta una dificultad aún mayor: que sea mucho menor que la escala de energía de los procesos físicos que la crearían.

DAVID EMMITE (*fotografía*)



AL FUGARSE de nuestro universo, las partículas de la gravedad explorarían un espacio de más dimensiones. La fuga se pondría de manifiesto sólo a escala cósmica.

Para soslayar esta posible incongruencia, se ha propuesto que la causa de la aceleración no reside en el espacio mismo, sino en un campo de energía que lo baña como una niebla enrarecida. La energía potencial de ciertos campos espacialmente uniformes simula los efectos de una constante cosmológica. A un campo así, el inflatón, se le atribuye la existencia del período de expansión acelerada, o inflación, del universo primitivo. Quizás otro campo como ése haya tomado el relevo, conduciendo el universo a otro período inflacionario. Quintaesencia es el nombre que se le da a este segundo campo. Al igual que la constante cosmológica, ha de tener un valor desusadamente pequeño, pero sus proponentes argumentan que a un ente dinámico le resulta más fácil la pequeñez que a una constante estática [*véase* "El universo y su quintaesencia", por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2001].

Tanto la constante cosmológica como la quintaesencia caen en la categoría general de energía oscura. Hasta el momento no se dispone de una explicación convincente para ninguna de ellas. Por eso ha habido que cavilar sobre las dimensiones adicionales, que automáticamente alterarían los efectos de la gravedad. Decaen, conforme a las reglas de la teoría de Newton y conforme a las de la relatividad general, con el cuadrado de la distancia entre los objetos. La razón es puramente geométrica: según un principio formulado por Carl Friedrich Gauss en el siglo XIX, la intensidad de la gravedad viene determinada por la densidad de líneas de fuerza gravitatoria; al aumentar la distancia, estas líneas se diseminan por unos contornos cada vez mayores. En el espacio tridimensional el contorno es una superficie bidimensional, cuya área crece con el cuadrado de la distancia.

Pero si el espacio fuera tetradimensional, el contorno sería tridimensional: un volumen cuyo tamaño crece como el cubo de la distancia.

En ese caso, la densidad de líneas de fuerzas decrecería con el cubo de la distancia. La gravedad sería, pues, más débil que en un mundo tridimensional. A escalas cosmológicas, el debilitamiento de la gravedad puede conducir a la aceleración cósmica, por razones de las que trataré más adelante.

Si la gravedad se puede mover en el espacio suplementario, ¿por qué no nos hemos dado cuenta de ello antes? ¿Por qué la ley tridimensional habitual, la del inverso del cuadrado, explica el movimiento de las piedras, los cohetes y los planetas de manera tan precisa? Una respuesta suele dar la teoría de cuerdas: que las dimensiones adicionales son "compactas", es decir, que se enrollan en círculos finitos, diminutos. Durante largo tiempo se pensó que medían una longitud de Planck, unos 10^{-35} metros, pero algunos trabajos recientes, teóricos y experimentales, muestran que podrían llegar a 0,2 milímetros [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000]. Unas dimensiones compactas alteran la gravedad sólo a distancias cortas, del orden de su radio, o menores aún. A larga distancia, rige la ley de la gravedad habitual.

Cárcel de gravedad

Mas la idea de las dimensiones compactas tiene sus dificultades. Cabría preguntarse por qué algunas dimensiones (las adicionales) quedan suprimidas, mientras otras (las familiares) se extienden sin fin. Dicho de manera diferente: bajo la influencia de la materia y la energía del universo, las dimensiones enrolladas deberían desenrollarse, a no ser que algo las estabilizase, quizás —una interesante posibilidad— ciertos campos predichos por la teoría de cuerdas, que recuerdan a los magnéticos, e impedirían que las dimensiones se contrajesen o expandieran. En 1999 se encontró otra posible solución. Quizá todas las dimensiones, incluso las adicionales, sean de tamaño infinito. El universo observable consistiría en una superficie tridimensional, o membrana ("brana", en apócope), de un mundo de dimensión más elevada. La materia ordinaria quedaría confinada en la brana, pero algunas fuerzas, como la gravedad, podrían escapar de ella.

La gravedad escapa porque difiere de raíz de las otras fuerzas. Según la teoría cuántica de campos, la transfiere una partícula específica, el gravitón. La atracción gravitatoria resulta de un flujo de gravitones entre dos cuerpos, de la misma suerte que la fuerza de la electricidad o del magnetismo resultan de un flujo de fotones entre dos partículas cargadas. Con una gravedad estática, esos gravitones son "virtuales"; aunque se miden sus efectos, no se puede observarlos como partículas independientes. El Sol mantiene a la Tierra en su órbita porque emite gravitones virtuales que nuestro planeta absorbe. Los gravitones "reales", o directamente observables, corresponden a las ondas gravitatorias que se despiden bajo ciertas circunstancias.

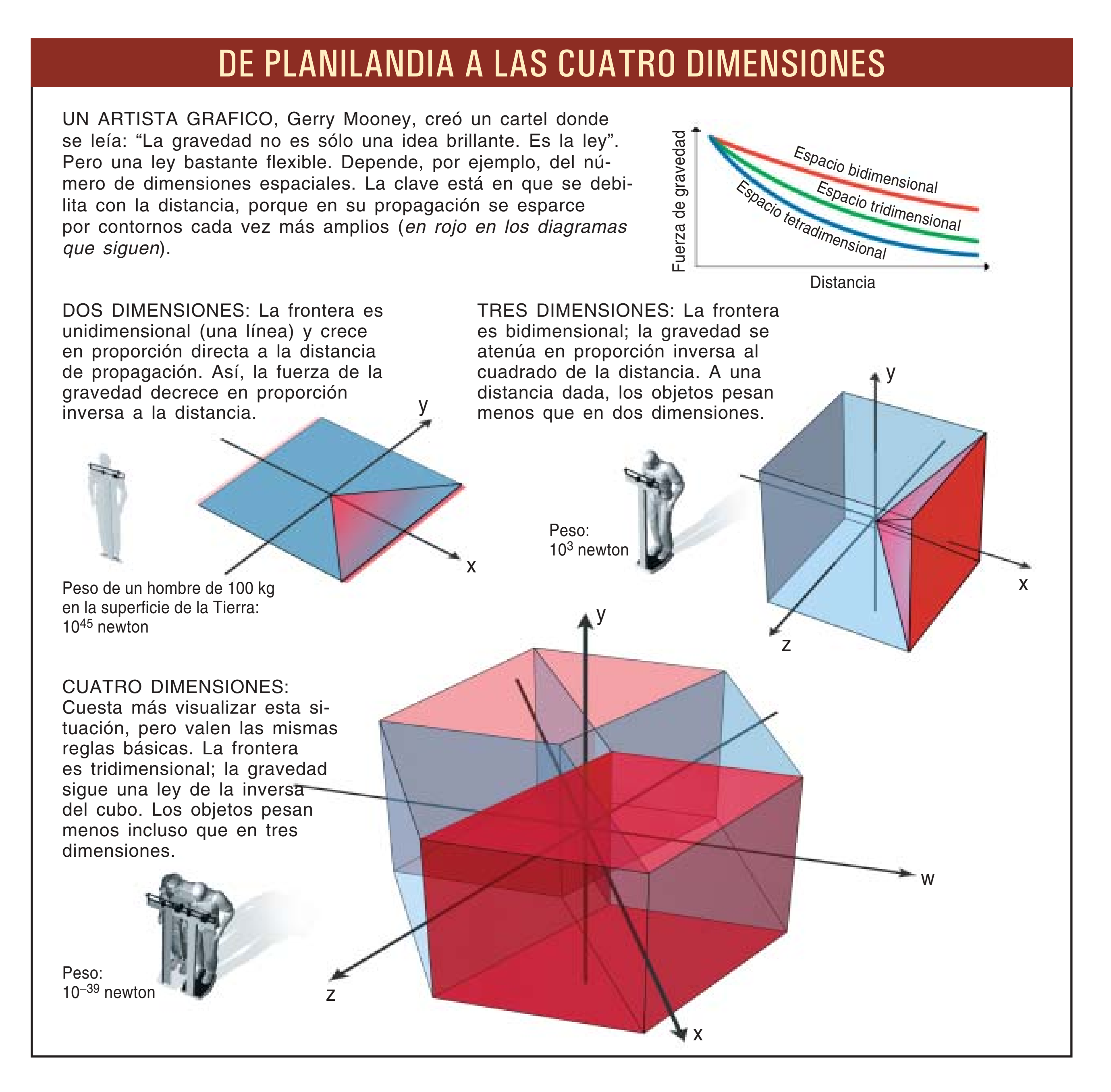
Según los concibe la teoría de cuerdas, los gravitones, como toda partícula, no son sino las vibraciones de unas cuerdas diminutas. Pero mientras que el electrón, el protón y el fotón son vibraciones de cuerdas con los extremos abiertos, como cuerdas de violín, el gravitón es la vibración de aros de cuerda cerrados, a la manera de gomas elásticas. Joseph Polchinski, del Instituto Kavli de Física Teórica en Santa Barbara, ha demostrado que los cabos de las cuerdas abiertas no pueden agitarse libremente; deben estar sujetos a una brana. Si se intentara despegar una cuerda abierta de una brana, se alargaría, como una cuerda elástica, pero seguiría sujeta a la brana. Por el contrario, las cuerdas cerradas, como el gravitón, no se adhieren. Son libres de explorar las diez dimensiones del espacio.

Claro que los gravitones no disponen de libertad absoluta. Si no, la ley habitual de la gravedad fallaría irremisiblemente. Los autores de la hipótesis de las dimensiones infinitas, Lisa Randall y Raman Sundrum, sugieren que los gravitones se ven coartados porque las dimensiones adicionales, al contrario de las tres que nos son familiares, exhiben una fuerte curvatura que crea un valle de laderas muy abruptas, difíciles de salvar.

El quid se halla en que el volumen efectivo de las dimensiones adicionales resulta finito a causa de lo curvadas que están, pese a su extensión infinita. ¿Cómo puede contener un espacio infinito un volumen finito? Imaginemos que servimos licor en una copa sin fondo cuyo radio disminuye en proporción inversa a su profundidad. Para llenar el recipiente bastaría una cantidad finita de licor. Debido a la curvatura del vaso, su volumen se concentra en la parte de arriba. Es algo similar a lo que ocurre en el esquema de Randall-Sundrum. El volumen del espacio adicional se concentra en torno a nuestra brana. En consecuencia, un gravitón se ve forzado a pasar la mayor parte del tiempo cerca de ella. La probabilidad de detectar el gravitón disminuye rápidamente en función de la distancia. En jerga cuántica, la función de onda del gravitón tiene un máximo en la brana; "localización de la gravedad" se denomina a este efecto.

Resumen/Fugas gravitatorias

- Se suele atribuir la expansión acelerada del universo a una desconocida energía oscura. Pero podría ser un indicio de que las leyes habituales de la física fracasan a escalas muy grandes.
- De la teoría de cuerdas (una de las más firmes candidatas a teoría unificada de la naturaleza) se obtiene una nueva ley de la gravedad. De ordinario, se considera a la teoría de cuerdas una teoría de lo muy pequeño, pero tiene también consecuencias macroscópicas.
- En particular, predice que el universo posee dimensiones adicionales hacia donde podría escapar la gravedad, mientras que la materia ordinaria queda atada a las tres dimensiones corrientes. Esa fuga curvaría el continuo del espacio-tiempo y aceleraría la expansión cósmica. Quizá tenga incluso un efecto minúsculo, pero observable, en el movimiento de los planetas.



BRYAN CHRISTIE DESIGN; FUENTE: JEFFREY WEEKS (CUBO TETRADIMENSIONAL)

Aunque el modelo de Randall-Sundrum y el de las dimensiones compactas difieren conceptualmente, acaban en algo muy parecido. Ambos modifican la ley de la gravedad a corta distancia pero no a larga, de modo que ni el uno ni el otro explican la aceleración cósmica.

Física en la brana

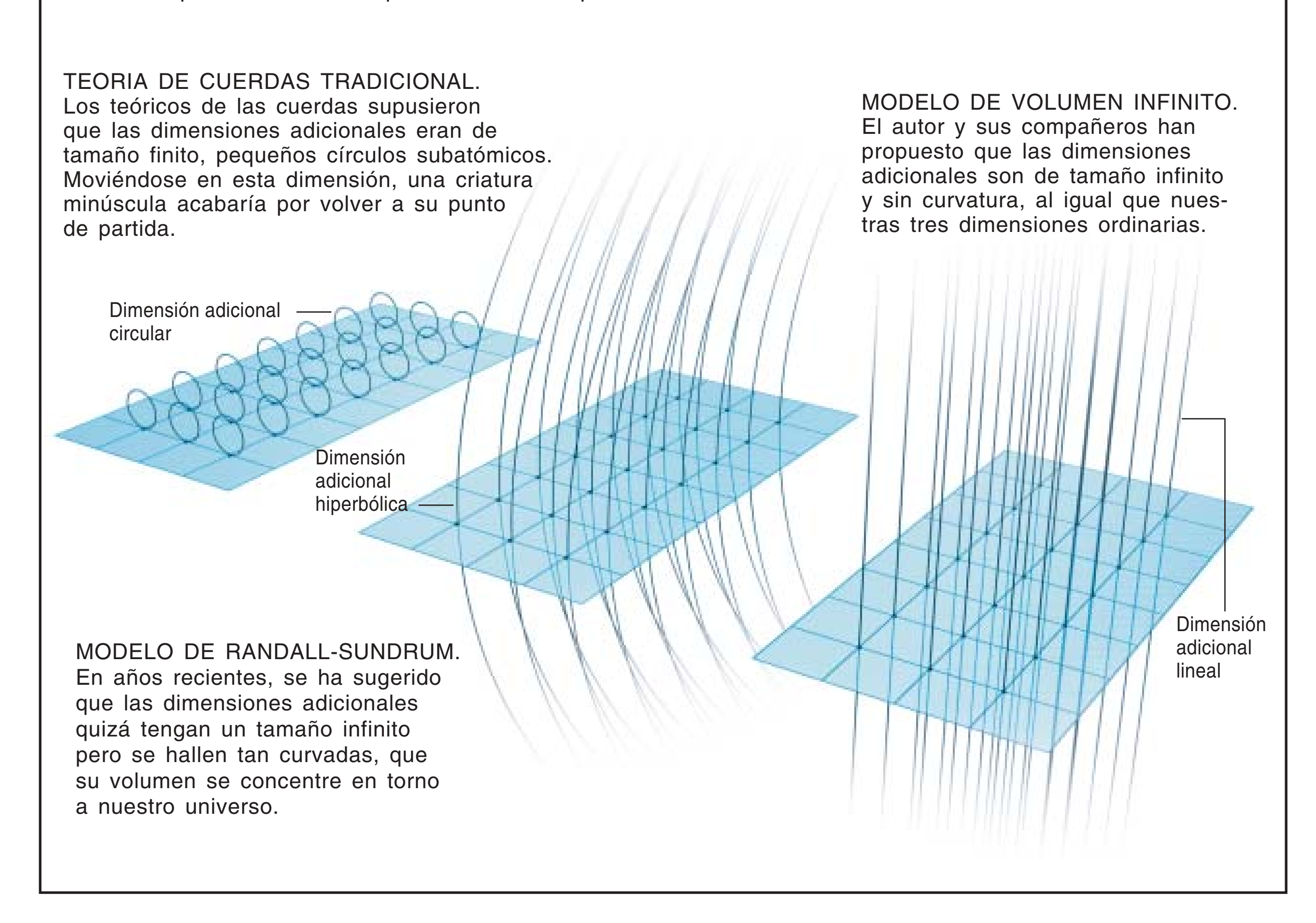
Pero un tercer enfoque sí predice el fallo de las leyes habituales de la gravedad a escalas cosmológicas y explica la aceleración de la expansión sin necesidad de recurrir a la energía oscura. En el año 2000 Gregory Gabadadze, Massimo Porrati y el autor propusieron que las dimensiones adicionales eran exactamente como las tres que conocemos. Ni más compactas, ni más curvadas.

A pesar de todo, los gravitones no poseen completa libertad de movimiento. Emitidos por las estrellas y otros objetos localizados en las branas, pueden escapar a las dimensiones adicionales, pero sólo si recorren cierta distancia crítica. Los gravitones se comportan como el sonido en una plancha metálica. Si se golpea la plancha con un martillo, se crea una onda sonora que viaja por su superficie. Pero la propagación del sonido no es exactamente bidimensional; una parte se pierde en el aire circundante. Cerca de donde golpeó el martillo, esta pérdida de energía es desdeñable. Más lejos, sin embargo, se vuelve perceptible.

Esta fuga tiene un profundo efecto en la fuerza gravitatoria entre objetos separados por una distancia superior a la crítica. Los gravitones virtuales tratan de utilizar cualquier ruta posible entre los objetos; las fugas abren un enorme número de desvíos multidimensionales. Se produce así un cambio en la ley de la gravedad. Los gravitones reales que se fugan se pierden para siempre, y

TRES MANERAS DE AÑADIR UNA DIMENSION

ALBERT EINSTEIN y otro científicos de su generación, entre los que destacan Theodor Kaluza y Oskar Klein, quedaron prendados con la idea de que el espacio posee dimensiones ocultas. Esta hipótesis pervive en la teoría de cuerdas. Para entenderla mejor, pensemos en nuestro universo tridimensional como en una cuadrícula plana. Una línea representa en cada punto de la cuadrícula una de las dimensiones adicionales.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

a los que estamos pegados a la brana nos parece que se han esfumado.

Las dimensiones adicionales también se ponen de manifiesto a escalas muy pequeñas, tal y como sucede en las hipótesis compacta y de Randall-Sundrum. A distancias intermedias —mayores que el tamaño de las cuerdas, pero menores que la distancia de fuga—, los gravitones son tridimensionales y obedecen muy de cerca la ley ordinaria de la gravedad.

La clave de este tercer modelo se encuentra en la brana misma. Es un objeto material por derecho propio; la gravedad se difunde por ella de manera diferente que por el espacio circundante. Las partículas ordinarias pueden existir en la brana y sólo en la brana. Incluso en una que parezca vacía bullirá una masa de partículas virtuales (electrones, protones y demás) que las fluctuaciones cuánticas crean y destruyen sin cesar. Estas partículas virtuales no sólo generan gravedad; también reaccionan a ella. El espacio circundante, por el contrario, se halla vacío de verdad. Los gravitones pueden vagar por él cuanto quieran, pero no tendrán sobre qué actuar, excepto sobre los demás gravitones.

La analogía del dieléctrico

Se puede trazar una analogía con un material dieléctrico (plástico, cerámica o agua pura). Contendrá partículas cargadas eléctricamente, inexistentes allá donde se haya hecho un vacío perfecto. Reaccionará, por lo tanto, a un campo eléctrico. Las partículas cargadas no pueden fluir a través del dieléctrico (podrían a través de un conductor de la electricidad), pero sí disponerse de otra manera en el interior del mismo. Si se aplica un campo eléctrico, el material se polarizará eléctricamente. En el agua, por ejemplo, las moléculas giran de manera que sus extremos positivos (los dos átomos de hidrógeno) apuntan en una dirección, y los extremos negativos (el átomo de oxígeno) en la opuesta. En el cloruro sódico, los iones positivos del sodio y los negativos del cloro se separan un poco.

La redistribución de las cargas establece un campo eléctrico aparte, que neutraliza en parte el externo. Un dieléctrico altera así la propagación de los fotones, que no son sino campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Los fotones que

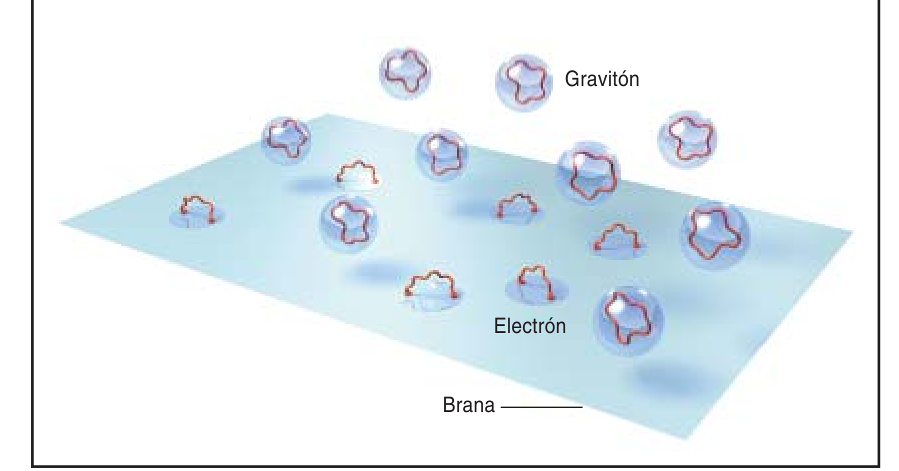
penetran en un dieléctrico lo polarizan; a la vez, se los anula parcialmente. Para que se produzca este efecto, el fotón debe tener una longitud de onda que caiga dentro de cierto intervalo: los fotones de longitud de onda larga (momento pequeño) resultan demasiado débiles para polarizar el dieléctrico, los de longitud de onda corta (momento grande) oscilan demasiado deprisa para que las partículas cargadas reaccionen. Por esta razón, el agua, transparente para las ondas de radio (que tienen una longitud de onda larga) y la luz visible (longitud de onda corta), es opaca para las microondas (de longitud de onda intermedia). Los hornos de microondas se sirven de esto.

De manera similar, las fluctuaciones cuánticas convierten la brana en el equivalente gravitatorio de un dieléctrico. Como si se poblara de partículas virtuales de energía positiva y negativa. Si se aplica un campo gravitatorio externo, se polarizará gravitacionalmente. Las partículas de energía positiva se separarán un poco de las de energía negativa. Un gravitón, que encarna un campo gravitatorio oscilante, puede polarizar la brana y ser cancelado si su longitud de onda cae en el intervalo adecuado; el cual, según hemos calculado, va desde los 0,1 milímetros (o menos, dependiendo del número de dimensiones adicionales) a unos diez mil millones de años luz.

Esta anulación afecta sólo a los gravitones que se propagan hacia o desde la brana. Los gravitones, como los fotones, son ondas transversales: oscilan perpendicularmente a su dirección de propagación. Un gravitón que entre o salga de la brana tenderá a impeler las partículas a lo largo de la brana, dirección por la que las partículas pueden moverse. Por lo tanto, esos gravitones polarizan la brana, polarización que, a su vez, puede anularlos a ellos. Pero los gravitones que se propagan por la brana intentan sacar a las partículas de ésta, es decir, los impulsan en una dirección que les está vedada. Esos gravitones, pues, no polarizan la brana y se mueven sin encontrar resistencia. En la práctica, la mayoría de los gravitones caen entre estos dos extremos. Atraviesan el espacio formando, con respecto a la brana, un ángulo oblicuo; pueden recorrer miles de millones de años luz antes de quedar anulados.

LOS HURAÑOS VINCULOS DE LAS BRANAS

POR DESGRACIA, aunque existan, nunca podremos aventurarnos por las dimensiones adicionales. Las partículas de que estamos compuestos —protones, neutrones, electrones— son modos vibracionales de cuerdas con los extremos abiertos. Este tipo de cuerda, por su misma naturaleza, está ligado a la membrana, o brana, que constituye nuestro universo. Los gravitones, las partículas de la fuerza gravitatoria, eluden estas ligazones porque carecen de extremos para adherirse.



Curvatura de branas

Así es como la brana se resguarda de las dimensiones adicionales. Si un gravitón de longitud de onda intermedia pretende escapar de ella, o penetrar en su interior, las partículas presentes en la brana se redistribuirán y lo bloquearán. Los gravitones, pues, deben moverse a lo largo de la brana, con lo que la gravedad sigue una ley del inverso del cuadrado. Los gravitones de longitud de onda larga, sin embargo, cuentan con libertad para adentrarse en las dimensiones adicionales. Son irrelevantes a corta distancia, pero dominan en las distancias semejantes a su propia longitud de onda, o mayores, y socavan la capacidad de la brana de aislarse de las dimensiones adicionales. La ley de la gravedad se aproxima a una ley del inverso del cubo (si sólo una de las dimensiones adicionales es infinita), a una ley del inverso de la potencia cuarta (si son dos las infinitas) o a una ley donde la intensidad disminuya aún más deprisa. En todos estos casos, la gravedad resulta debilitada.

Cédric Deffayet, Gabadadze y el autor han encontrado que las dimensiones adicionales no sólo minan la fuerza de la gravedad; compelen a que la expansión cósmica se acelere sin necesidad de estipular la existencia de energía oscura. Se estaría inclinado a pensar que, al debilitar el pegamento gravitatorio que retarda la expansión, la fuga de gravitones reduce la deceleración hasta el punto de que se vuelva negativa, es decir, se convierta en una aceleración. Pero el efecto es más complicado. Viene dado por los detalles de la modificación de la relatividad general debida a la fuga de gravitones.

La teoría de Einstein se fundamenta en que la gravitación sea una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo, y en que ésta dependa a su vez de la densidad de materia y energía que haya en el espacio-tiempo. El Sol atrae a la Tierra curvando el espacio-tiempo en derredor suyo. La ausencia de materia y de energía implica ausencia de curvatura y de gravedad. En la teoría pluridimensional, sin embargo, la relación entre curvatura y densidad cambia. Las dimensiones adicionales introducen un término corrector en las ecuaciones, que curva las branas vacías: la fuga de

gravitones imparte una tensión a la brana que confiere a ésta una curvatura irreducible, independiente de la densidad de materia y energía.

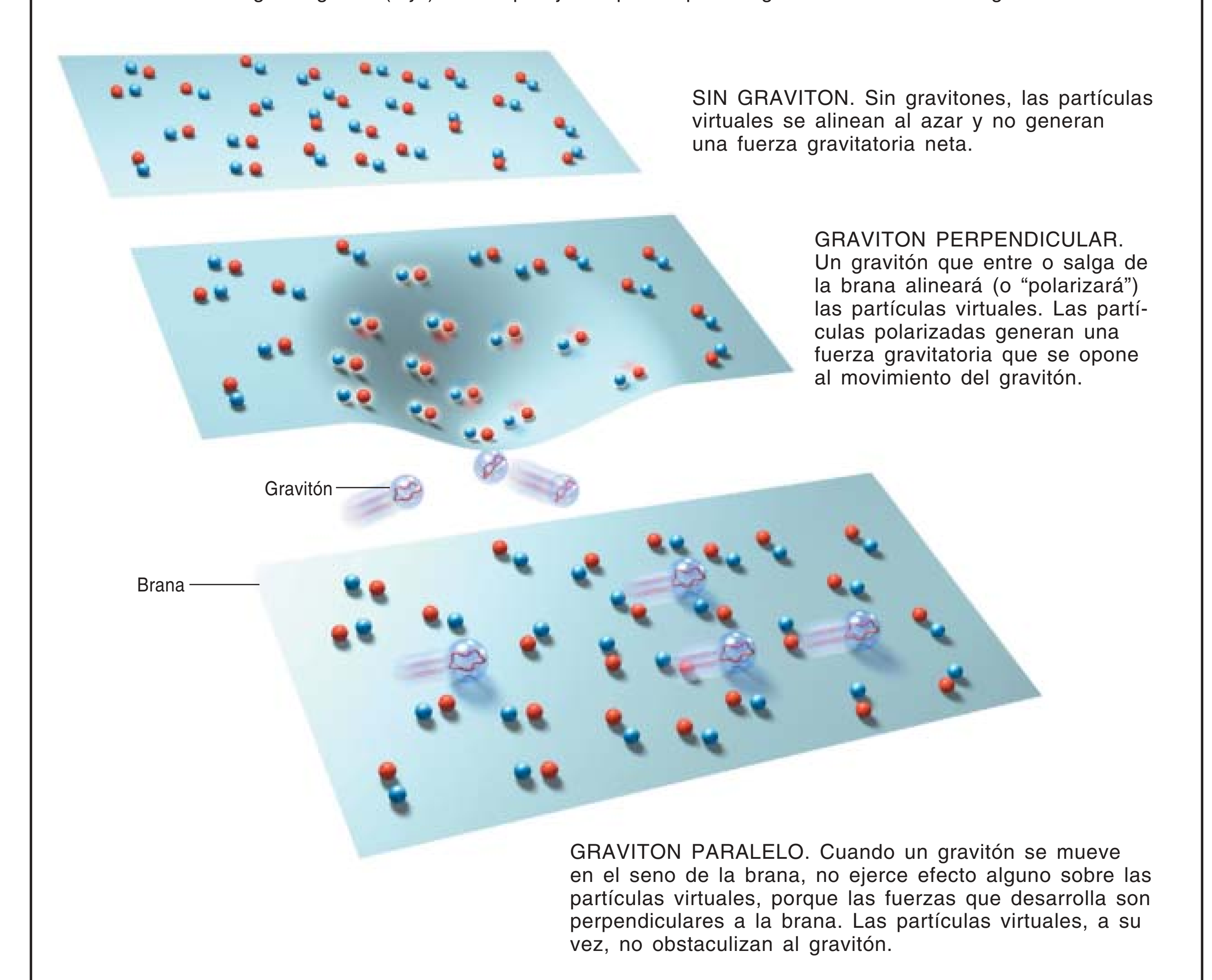
Con el tiempo, conforme la materia y la energía se diluyen, la curvatura que causan decrece; por lo tanto, la curvatura irreducible adquiere cada vez mayor importancia y la curvatura del universo se aproxima a un valor constante. El mismo efecto se produciría si impregnase el universo de una sustancia que no se diluyera con el tiempo. O, lo que es lo mismo, una constante cosmológica. Por lo tanto, la curvatura irreducible de una brana actúa como una constante cosmológica, que acelera la expansión cósmica.

Consecuencias lunares

No sólo en nuestra teoría falla la ley gravitatoria corriente a grandes distancias. En 2002 Thibault Damour, Antonios Papazoglou y Ian Kogan enunciaron la hipotética existencia de gravitones de una variedad distinta, dotada de una pequeña masa (los gravitones normales carecen de ella). La gravedad no seguiría la ley del inverso del cuadrado si los gravitones tuviesen masa, porque serían inestables; se irían desintegrando. El efecto final apenas si se distinguiría de las consecuencias de la fuga de gravitones: los que recorriesen largas distancias desaparecerían, la gravedad se debilitaría y la expansión cósmica se aceleraría. Sean Carroll, Vikram Duvvuri, Michael Turner y Mark Trodden han modificado la teoría de Einstein en tres dimensiones añadiéndole unos términos minúsculos inversamente proporcionales a la curvatura del espaciotiempo. Resultarían despreciables en el universo primitivo, pero acele-

LA BRANA POLARIZADA

LOS GRAVITONES no disfrutan sin cortapisas de su libertad de vagar por las dimensiones adicionales. Nuestro universo tridimensional, o brana (aquí se muestra como una hoja plana), está lleno de partículas "virtuales" que aparecen y desaparecen sin cesar. Para comprender su efecto en los gravitones, cabe considerar que se dan por parejas. A una de las partículas de cada pareja le corresponde una energía positiva (*azul*), a la otra una energía negativa (*rojo*). Tales parejas impiden que los gravitones entren o salgan de la brana.

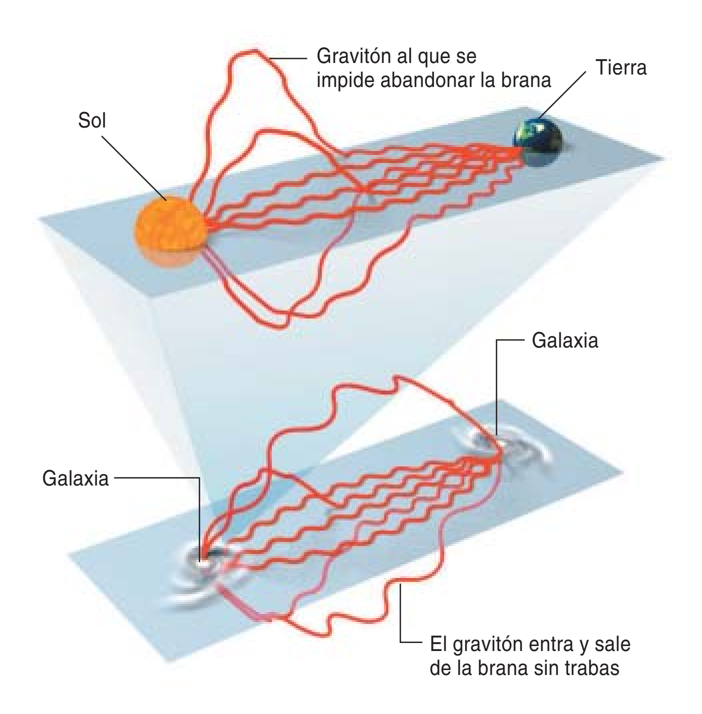


BRYAN CHRISTIE DESIGN

GRAVEDAD CERCA Y LEJOS

LAS PARTICULAS DE NUESTRO UNIVERSO tienden a obstaculizar el paso de los gravitones, pero sólo si éstos tienen momento suficiente para provocar una reacción. Los gravitones de momento pequeño (con una longitud de onda larga) entran y salen de la brana sin trabas.

El Sol ejerce una fuerza sobre la Tierra al emitir gravitones virtuales de una longitud de onda bastante corta (de momento elevado). Se les impide, pues, salir de la brana. Se comportan como si las dimensiones adicionales no existieran.



Dos galaxias lejanas emiten gravitones de longitud de onda larga (de momento pequeño). Nada impide que estos gravitones escapen a las dimensiones adicionales. La ley de la gravedad, en consecuencia, cambia y la fuerza entre las galaxias se debilita.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

rarían la expansión más tarde. Otros grupos han sugerido modificaciones a la ley de la gravedad, pero sus propuestas siguen necesitando una energía oscura que cause la aceleración.

Serán las observaciones quienes decidan finalmente entre estos modelos. Las observaciones de supernovas proporcionan una prueba directa. La transición de la deceleración a la aceleración es muy diferente en un modelo de fugas y en uno de energía oscura. Ulteriores mejoras en la precisión de esas observaciones podrían discriminar entre las teorías.

El movimiento de los planetas ofrece otra comprobación empírica. Una onda gravitatoria, al igual que una onda electromagnética ordinaria, puede tener direcciones preferentes de oscilación. La relatividad general permite dos; otras teorías de la gravitación, más. Estas posibilidades adicionales modifican la fuerza gravitatoria. El cambio es pequeño pero no despreciable: las modificaciones que producirían en el movimiento planetario podrían observarse. Andrei Gruzinov, Matias Zaldarriaga y el autor han calculado que la fuga de gravitones causaría una lenta precesión de la órbita de la Luna. Cada vez que completara una órbita, su mayor aproximación a la Tierra cambiaría en una billonésima de grado (medio milímetro, más o menos). No escapa demasiado de la resolución de las telemetrías lunares, que determinan la órbita de la Luna enviando rayos láser que se reflejan en los espejos dejados por los astronautas de las misiones Apolo en la Luna. La precisión actual es de un centímetro. Eric Adelberger y su equipo de la Universidad de Washington proponen utilizar láseres más potentes, que decupliquen la sensibilidad. Los seguimientos desde tierra de las sondas espaciales podrían buscar una precesión similar en la órbita de Marte.

El mero hecho de que se piense siquiera en poner a prueba la teoría de cuerdas apasiona. Durante años, se dio por sentado que la teoría trataba de escalas tan pequeñas, que nunca habría experimento capaz de refutarla. Con la aceleración cósmica, la naturaleza quizá nos haya regalado un medio de escudriñar dimensiones adicionales que, si no, nos estarían vedadas para siempre. Un puente entre lo pequeñísimo y lo extraordinariamente grande.

El autor

Georgi Dvali recibió el doctorado en el Instituto de Física Andronikashvili, de Tiflis. Tras trabajar en la Universidad de Pisa, en el CERN y en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, obtuvo una plaza de profesor de física en la Universidad de Nueva York.

Bibliografía complementaria

AN ALTERNATIVE TO COMPACTIFICATION. Lisa Randall y Raman Sumdrum en *Physical Review Letters*, vol. 83, n.º 23, págs. 4690-4693; 6 de diciembre de 1999.

ACCELERATED UNIVERSE FROM GRAVITY LEAKING TO EXTRA DIMENSIONS. Cédric Deffayet, Gia Dvali y Gregory Gabadadze en *Physical Review D*, vol. 65, n.º de artículo 044023; 2002.

THE ACCELERATED UNIVERSE AND THE MOON. Gia Dvali, Andrei Gruzinov y Matias Zaldarriaga, en *Physical Review D*, vol. 68, n.º de artículo 024012; 2003.

TESTS OF THE GRAVITATIONAL INVERSE-SQUARE LAW. E. G. Adelberger, B. R. Heckel y A. E Nelson en *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 53, págs. 77-121; diciembre de 2003.

Máquinas e instrumentos científicos de la Real Academia de Ciencias de Barcelona

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, la Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona recurrió a los artesanos para fabricar las máquinas e instrumentos de la nueva física. Nombró académicos a destacados artesanos

Carles Puig Pla

Con el Renacimiento se asiste en Europa a una apreciación favorable de los procedimientos empleados en las artes y oficios mecánicos. Las técnicas artesanales, consideradas tradicionalmente actividades serviles, poco nobles, empezaron a ser percibidas como medios imprescindibles para el progreso de la ciencia y del conocimiento efectivo de la realidad natural. Luis Vives declaraba que el hombre culto no debía avergonzarse de entrar en los talleres y preguntar por las técnicas empleadas en sus artes.

En la centuria siguiente, Francis Bacon, William Harvey, Galileo Galilei y Robert Boyle, entre otros, recurrieron a la experimentación y la observación de la naturaleza. El aprecio creciente por el trabajo artesanal culminaría en el siglo de las luces. En el propio "Discurso preliminar" de la *Encyclopédie*, Jean Le Rond D'Alembert reconocía la sagacidad de los artesanos en su equiparación de los "olvidados inventores de ingeniosas y complicadas máquinas" con los espíritus creadores que habían abierto nuevos caminos a la ciencia.



1. EL LEMA de la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona "Utile non subtile legit", ponía el énfasis en lo útil frente a lo sutil y se simbolizaba mediante un cedazo que permitía el paso de lo útil.

CARLES PUIG PLA

Esa progresiva valoración de las artes mecánicas coincidió en el tiempo con la gestación y desarrollo de las nuevas ideas científicas. La Revolución Científica que tuvo lugar en la Europa de los siglos XVI y XVII condujo al establecimiento de los fundamentos de la física moderna. En 1687 la publicación de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ("Principios matemáticos de filosofía natural"), de Isaac Newton, sentaba las bases de la mecánica y culminaba un largo proceso encaminado a construir una *nueva* física acorde con las ideas heliostáticas propuestas por Nicolás Copérnico.

En el siglo XVIII, Willem Jacob Gravesande y Pieter van Musschenbroek introdujeron la física experimental newtoniana en Leiden. Desde allí, se difundió por todo el continente. Las obras de estos autores, junto con las de Nicolas Bion, Jean Théophile Desaguliers, el abate

Nollet y otros contribuyeron a propagar el conocimiento de la física experimental —y del instrumental asociado— en España durante la segunda mitad del siglo XVIII. Pero una completa asimilación de la nueva ciencia requería, además, poder experimentar y, por tanto, disponer de máquinas e instrumentos científicos.

Dentro de España, Cataluña ocupaba un lugar destacado en el aprecio y el desarrollo de las artes menestrales. De ello dan fe numerosos escritos contemporáneos, nacionales y extranjeros, que ponderan en particular la industriosidad de Barcelona. En la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX, diversas iniciativas, particulares e institucionales, contribuyeron a acrecentar esta valoración social de los artesanos.

Las Academias

Un fenómeno característico del siglo XVII fue la creación de academias científicas. En 1603 apareció la Accademia dei Lincei en Roma, en 1657 la Accademia del Cimento en Florencia, tres años después la Royal Society de Londres y, en 1666, la Académie des Sciences de París. En muchos casos vinieron precedidas por círculos ilustrados más o menos informales.

A imagen de lo que ocurre en Francia, la dinastía borbónica impulsa en la España del siglo XVIII la erección de instituciones de carácter científico, vinculadas en su mayoría al Ejército. Durante el reinado de Carlos III (1759-1788), período de esplendor de la Ilustración española, se consolidaron y revitalizaron instituciones científicas ya existentes y se crearon otras nuevas, públicas o privadas. Entre ellas, la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona.

Los orígenes de la entidad barcelonesa remontan a una tertulia influida por el padre Tomàs Cerdà, profesor de matemáticas y física, de 1757 a 1764, en el Seminario de Nobles de Santiago de Cordelles. Cerdà había ampliado su formación en el Real Observatorio de Marsella, dirigido entonces por Esprit Pezenas, traductor al francés del *Curso de Física Experimental* de Desaguliers. La tertulia científica,



2. ACTUAL EDIFICIO MODERNISTA de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, sito en su famosa rambla. Obra del arquitecto y académico Josep Domènech y Estapà, fue inaugurado en 1894 en el mismo terreno concedido a la Academia por privilegio real en 1786.

CARLES PUIG PLA

de iniciativa privada, fue semilla de la Conferencia físico-matemática experimental, constituida por 16 miembros.

En menos de dos años de funcionamiento, esta asociación recibió la sanción regia. Una real cédula, otorgada por Carlos III a finales de 1765, transformaba la Conferencia informal en una institución de derecho público, la Real Conferencia Física. Se ampliaba el campo de las disciplinas cultivadas (física y matemática) con la incorporación de la historia natural, la botánica y la química. Quedaban establecidas ocho secciones o *direcciones*: 1) álgebra y geometría; 2) estática, hidrostática y meteorología: 3) electricidad, magnetismo y otras atracciones; 4) óptica y sus partes; 5) neumática y acústica; 6) historia natural; 7) botánica y 8) química.

Al año siguiente, y al parecer por voluntad explícita de la monarquía, se añadió la dirección de agricultura. En 1770 la Conferencia sufrió una ulterior transformación, convirtiéndose en Real Academia de Ciencias Naturales y Artes.

La Conferencia tuvo como primer objetivo la explicación de un curso físico-matemático-experimental, que fue encomendado a Francesc Subiràs, discípulo de Cerdà y su primer director. Se seguía el *Essai de Physique*, traducción francesa del texto de Musschenbroek. Pero se necesi-



3. JOAN GONZALEZ Y FIGUERES (1731-1807), primer académico artista de la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes. En reconocimiento por los múltiples trabajos que este maquinista y constructor de instrumentos realizó para la Academia, esta institución hizo grabar su efigie en un medallón que se conserva en la sede de la institución.

taban máquinas e instrumentos científicos para reproducir los experimentos. En Barcelona no existía tal aparataje. ¿Dónde conseguirlo? El mismo mes de la inauguración de la Conferencia, enero de 1764, Desvalls, secretario de la institución, escribió a Buenaventura Abad, en Marsella a la sazón. Abad, franciscano versado en matemática y óptica, había publicado, en 1763, unos *Amusements Philosophiques.* En la misiva Desvalls le pedía consejo sobre los mejores fabricantes de máquinas neumáticas y le solicitaba una lista de todo género de vidrios que pudiesen ser útiles para realizar los experimentos con arreglo al manual de Musschenbroek.

Abad contestó que, para desarrollar un curso experimental, resultaba más idóneo el *Curso de física experimental* de Nollet, ya traducido al español, o bien la *Physices elementa mathematica: experimentis confirmata* ("Elementos matemáticos de física, confirmados con experimentos") de Gravesande, un texto más profundo, aunque menos claro, que el de Nollet. En cuanto a los experimentos relativos a la máquina neumática, aconsejaba las indicadas por Jean Musschenbroek que aparecían en el *Essai*. Para la adquisición de la maquinaria recomendaba los fabricantes de París o, también, los holandeses de acuerdo con el catálogo de instrumentos citados al final del libro de Musschenbroek.

Máquinas y aparataje instrumental

Se descartó la vía francesa y se decidió la compra de máquinas de Holanda. El *Essai* incluía láminas que ilustraban los instrumentos y ofrecía una lista de máquinas de física, matemática, anatomía y cirugía, con sus precios y la posibilidad de adquirirlos en Leiden en casa de Jean van Musschenbroek, hermano del autor de la obra. Pero ni en los libros de tesorería ni en las facturas que se conservan en la Academia de Ciencias aparece ningún pago de máquinas traídas de los Países Bajos.

La Conferencia, quizás ante el elevado coste de la instrumentación, debió de considerar la posibilidad de fabricarlas en Barcelona. Observamos, en efecto, que varias de las máquinas descritas en el libro de Musschenbroek fueron realizadas, ya en 1764, por artesanos locales, bajo la dirección de Jaume Bonells. A partir de los libros contables, facturas y recibos del Archivo de la Real Academia de Ciencias y Artes conocemos un largo elenco de artesanos que trabajaron para la Conferencia: Armenter Rivera, que construyó el encerado para las demostraciones; Rafael Gorina, seguramente hojalatero; Francesc Vaquer, artífice del marfil; Ramon Esplugues, Jaume Sadurní, Francesc Vila y Anton Capellà, carpinteros; Francesc Espar y Tomàs Fages, estañadores; Onofre Camps, Eudald Deop y Emmanuel Balaguer, cerrajeros; Pau Vidal y Josep Serra, torneros.

A esa primera hornada cabe atribuirle, con los bancos de pruebas, la preparación de cilindros de plomo y de latón, esferas, agujas, poleas, bisagras y múltiples piezas de cobre, bronce, latón, hierro, vidrio, marfil o madera, destinadas a la construcción, entre otras, de la máquina de las fuerzas centrales, una máquina eléctrica, balanzas, una romana, un cuadro vertical para demostrar la composición de movimientos, una grúa de Padmore, un tribómetro, un manubrio para la máquina neumática, la máquina óptica de Newton, una máquina que demuestra el equilibrio, un nivel para medir el ascenso del péndulo, la máquina de la media cicloide con dos canales y la máquina de la cicloide y canal recto, una máquina de percusión, instrumentos de hidrostática y una máquina hidráulica.



4. PIROMETRO construido en Madrid por Diego Rostriaga. Con él se podía determinar el coeficiente de dilatación de las barras metálicas. Fue ofrecido a la Real Conferencia Física de Barcelona por el duque de Alba en 1767.

CARLES PUIG PLA; CORTESIA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES DE BARCELONA (*abajo*)

5. MAQUINA ELECTROSTATICA de Ramsden de disco de vidrio de 41 centímetros, construida por Francesc González en julio de 1773 a imitación de otro modelo creado por un artífice italiano de paso por Barcelona.



CARLES PUIG PLA, CORTESIA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES DE BARCELONA

No todos los aparatos construidos se extrajeron del *Essai*. Ni siquiera la mayoría. Predominaron las réplicas de las láminas de la *Physices elementa mathematica*, de Gravesande. Se conserva todavía en la biblioteca de la Academia una traducción de la obra al inglés, hecha por Desaguliers. Este *Mathematical Elements of Natural Philosophy comfirm'd by Experiments*, en dos volúmenes, es una edición de 1747 que contiene 127 láminas. No cabe duda de que se tomaron de aquí una gran parte de los modelos.

Se aprovechó también el paso por la ciudad de algún experto artífice. Así se compró en 1767 una máquina eléctrica, una cámara oscura y un cilindro óptico a Giuseppe Castellnovo, milanés en tránsito hacia Valencia. Del mismo modo, en 1770, se compró a otro viajero un espejo ustorio. Significativa resultó también la compra del "proceso" del dorado de los metales a un viajero italiano en 1773.

Pero no se abandonó del todo la adquisición del exterior. En el verano de 1764, Subiràs enviaba desde Madrid piezas de vidrio y cristal, dos globos eléctricos para montar la máquina eléctrica, 180 tubos barométricos, termométricos y capilares, 15 tubos de cristal de 32 pulgadas de París cada uno para un barómetro de agua, cuatro peras de cristal para las gravedades específicas y un prisma triangular. En 1768 Melchor Guardia, miembro de la Conferencia, debía comprar en Holanda termómetros Fahrenheit y barómetros. Un año después, otro encargo de barómetros y termómetros, ahora en Inglaterra, llegó en malas condiciones. (Los reparó en 1770 un constructor de termómetros que se encontraba de paso y a quien la Academia le compró otros.) En adelante, se fabricarían en Barcelona.

De la Corte llegó, gestionado quizá por Jaume Bonells, un pirómetro en 1767. Lo había construido Diego Rostriaga, relojero de Fernando VI. A Rostriaga se dirigieron los académicos en 1768 para solicitar el precio de un péndulo de segundos para cronometrar el tiempo en los experimentos. Nombrado en 1764 ingeniero de instrumentos de física y matemáticas, Rostriaga fue primer maquinista de física en el Real Seminario de Nobles de Madrid y, de 1770 a 1773, bajo la dirección de Jorge Juan, fabricó dos máquinas de Newcomen para los diques de Cartagena.

Según parece, Bonells, médico del duque de Alba, intervino también en otro envío de "varios instrumentos meteorológicos de los países extranjeros", encargo realizado, en 1786, por mandato real. Pero ese "cajón de instrumentos" procedente de Alemania que Floridablanca remitió a la Academia de Ciencias contenía únicamente un instrumento para medir la declinación magnética, un declinatorio, junto con las memorias de la Sociedad Meteorológica Palatina de Mannheim. La Academia no recibió los termómetros, barómetros e higrómetros que se suponía acompañaban al declinatorio. (Floridablanca reclamó luego el declinatorio. Quería disponer de un juego completo de los instrumentos y utilizarlo en el observatorio del Seminario de Nobles de Madrid donde se encontraba el resto.)

La Academia barcelonesa dedicaba particular atención a la observación meteorológica. En carta al conde de Floridablanca le comunicaba que había mantenido correspondencia con la Sociedad Palatina pidiéndole que le enviase un juego de instrumentos meteorológicos y que, después de estudiar las descripciones que de los mismos hacía aquella institución y tras repetidos experimentos, podía asegurar "que la graduación del termómetro ha padecido algunos defectos, que la calibración del barómetro es más exacta por el método que se sigue en la Academia y que el que ha servido a la Sociedad para la construcción del higrómetro no es el más reciente ni el más exacto". En esa misma línea, se tradujo del alemán un tratado de Hemmer, secretario de la Sociedad Palatina, que versaba sobre el modo de colocar los pararrayos en cualquier edificio, considerando la utilidad pública que con ello se podría conseguir. La traducción, realizada por el director de la sección de electricidad, Antoni Juglà, fue presentada en 1788.

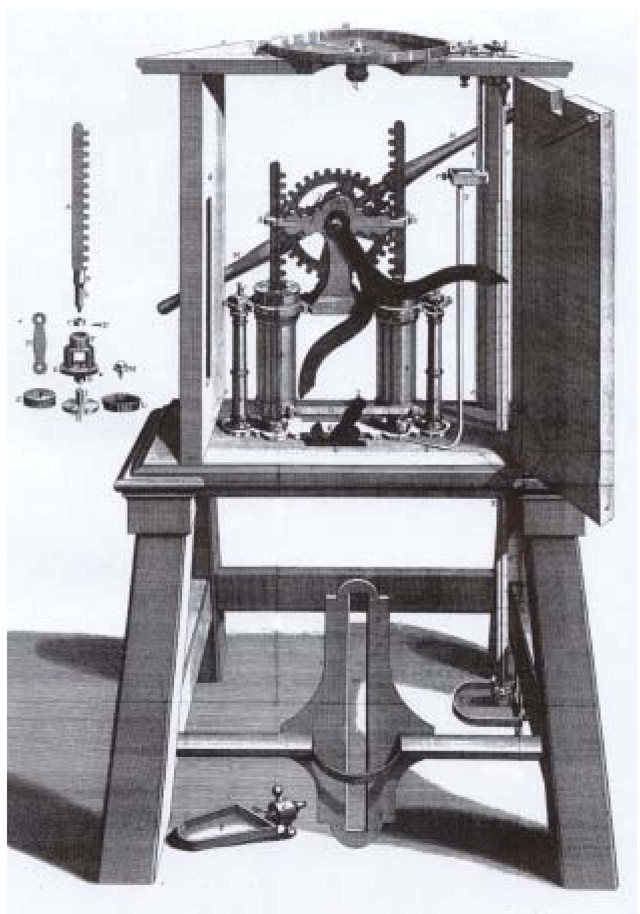
Académicos artesanos

Tal como indicaba su lema, "utile non subtile legit" (escoge lo útil no lo sutil, es decir, lo puramente especulativo), la Academia se propuso contribuir al progreso de las "artes", que así se llamaba entonces a lo que hoy denominaríamos técnica. Para ello, no se limitó a encargar la construcción de máquinas e instrumentos a diversos artífices. A los más hábiles los elevó a la categoría de académicos. Formaban el grupo de académicos "artistas".

En su fundación, la Conferencia físico-matemática experimental había establecido unas normas muy rígidas para la aceptación de nuevos miembros. Se exigía el dominio de las matemáticas puras. Sin embargo,



6. MAQUINA NEUMATICA de doble efecto con llave de Babinet. Construida por Joan González, sustituyó a otra que la Academia había mandado traer de Inglaterra y que estaba deteriorada. La Academia pagó a González por ella 250 libras en 1789.



7. REPRESENTACION de la máquina neumática que permite observar la disposición interior de los elementos de la misma, tal como aparece en el *Essai de Physique* de Musschenbroek.

al erigirse, en 1765, la Real Conferencia Física se produjo una mayor flexibilidad, reflejada en el artículo primero de los estatutos: "Deseando la Conferencia que, floreciendo las Ciencias Naturales, adquieran las Artes útiles su mayor grado de perfección, aplicará todos sus desvelos al cultivo de las Ciencias Naturales y al adelantamiento de artes útiles [...]; demostrando a los Artífices aquellos principios, que puedan guiarlos con seguridad al perfecto conocimiento de sus operaciones, examinando sus prácticas para corregirlas, facilitarlas y mejorarlas con nuevas máquinas e instrumentos". Se preveía, además, la creación de un gabinete que reuniese "los modelos de las máquinas e instrumentos más útiles a las artes y ventajosos para el público".

En 1767, la Conferencia nombró socio artista a Josep Eudald Paradell, maestro armero que había fabricado matrices de imprenta. Aunque fue en realidad un título honorífico, sentó un precedente que incidiría en el futuro funcionamiento de la entidad. Así, al constituirse ésta como Real Academia de Ciencias Naturales y Artes e incorporar las artes explícitamente en el nombre de la institución, los nuevos estatutos establecieron los requisitos para la integración de artistas. Concretamente, el artículo 92 estipulaba: "A fin de estimular a los Artífices a que se dediquen con todo fervor al adelantamiento de sus Artes, al que sobresaliere con invención de alguna máquina ventajosa, o de algún método muy útil, y económico en la práctica, o trabajando con primor extraordinario, o bien fabricando, o introduciendo el modo de manufacturar algunos géneros muy beneficiosos al Público, siendo Sujeto decente, y bien opinado, se le podrán dar honores de Académico, con el título de Académico Artista, reconociéndosele como a tal, y alternando con los demás, con relación a su antigüedad de admisión". Entre 1770 y 1824 se nombraron 25 académicos artistas, por lo menos.

Así entraron en la docta institución torneros, carpinteros, tejedores, cerrajeros, vidrieros, relojeros, cesteros, grabadores, arquitectos o pintores. Algunos llegaron a realizar actividades técnicas para la Academia en un trabajo conjunto con los académicos "literarios" y participaron en las sesiones "literarias", que incluían la lectura de memorias.

Joan González y Figueres fue el primer académico artista de la Academia, nombrado en 1776, y la personalidad más destacada de su grupo en el siglo XVIII. Tornero de profesión, construyó aparatos de física para el Colegio de Cirugía de Barcelona, a instancia de su director

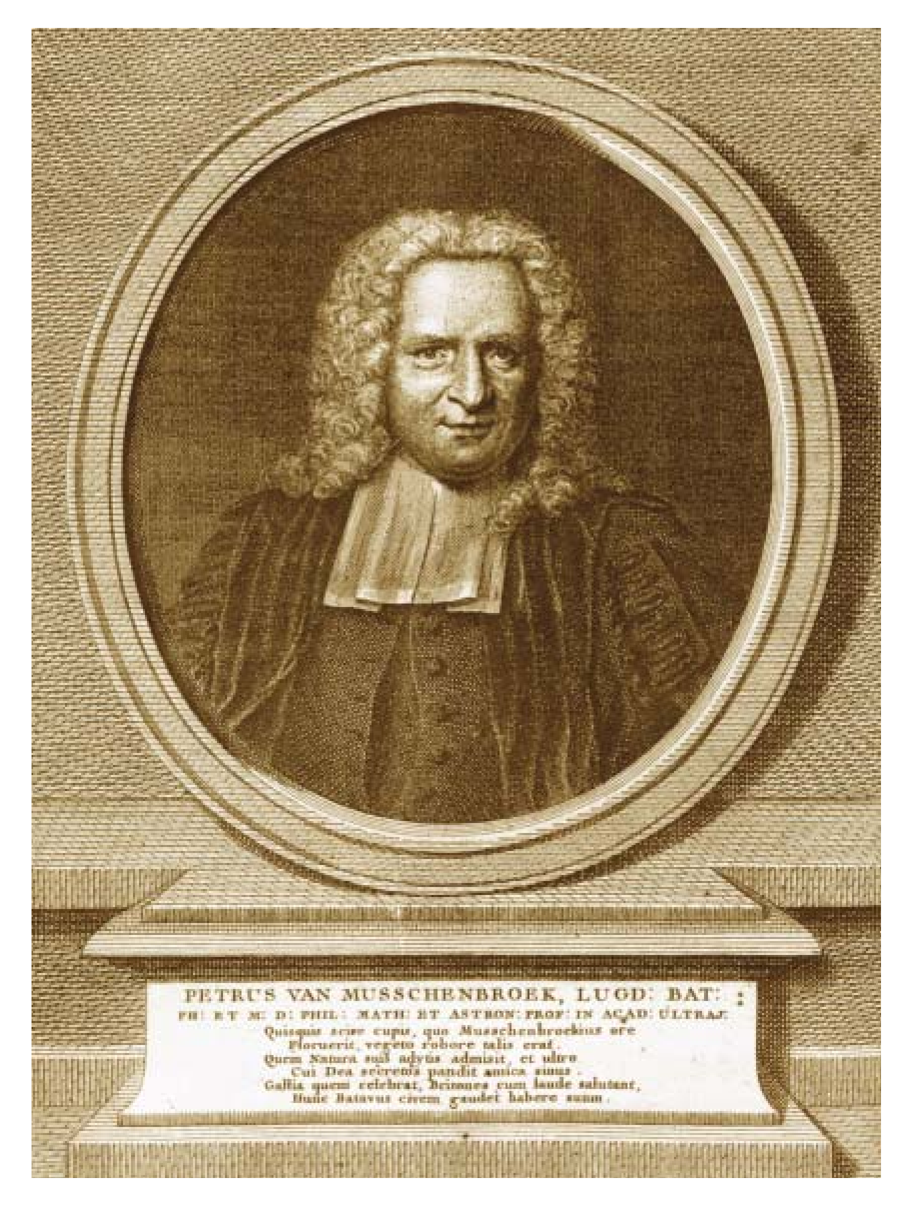
CARLES PUIG PLA; FUENTE: JOSEP IGLESIES, *La Real Academia de Ciencias Naturales y Artes en el siglo XVIII (izquierda)*; CARLES PUIG PLA *(derecha)*

Antoni de Gimbernat, y cuyo éxito llegó a la Universidad de Salamanca, que le encargó la fabricación de un conjunto de instrumentos y máquinas de física experimental, anatomía y cirugía.

Basados en obras de Gravesande, Nollet y Bion, se trataba de los aparatos siguientes: “La máquina de las fuerzas centrales, con todas sus piezas según Gravesande; la máquina eléctrica de nueva invención; la máquina neumática, con dos bombas para la extracción del aire, con los hemisferios, pieza para el descenso de los cuerpos graves y demás; la fuente de Herón según Gravesande; un cántaro para la compresión del aire, según Nollet; el pirómetro para la elasticidad de los metales, según Nollet; la cámara obscura, también según Nollet; la cámara óptica; tres espejos ustorios de metal, dos para reflexión del fuego, y el otro para la unión de los rayos del Sol; el semicírculo o transportador; el grafómetro, o goniómetro, con los dos anteojos y pínulas, y su brújula al medio según Bion. La mesa geométrica, con su nivel de agua y la regla para las visuales y para levantar planos; la piris magnética con sus pínulas según Bion. El ojo artificial, que consta de los cuatro músculos rectos y dos oblicuos, y el nervio óptico, la esclerótica, la córnea transparente, la úvea, con los procesos ciliares, y el iris, la retina, el humor vítreo y el humor cristalino. Varias piezas para inyecciones anatómicas, como jeringas, sifones y demás piezas; microscopio solar y otro microscopio ocular; piezas matemáticas, como son compases, círculos, escuadras, pantómetra, semicírculo, de talco y latón, y demás piezas”.

Se le atribuyen, entre otras, una máquina neumática que substituyó a otra inglesa que ya era inservible en 1789, microscopios solares y oculares, un corazón artificial, un órgano artificial del oído que el académico de la dirección de neumática, Leonardo Galli, utilizó para exponer alguna de sus memorias, un globo ocular artificial hecho bajo la dirección de Antoni de Gimbernat, que despertó la admiración del afamado profesor de anatomía de Edimburgo Alexander Monro, múltiples piezas para experimentos de estática e hidrostática, modelos de instrumentos agrícolas, juegos de palancas y de poleas, planos inclinados, un tribómetro y una máquina de las fuerzas centrales completa para sólidos y fluidos. González también fabricó máquinas e instrumentos para las minas de Almadén, la Real Academia Militar de Matemáticas, la Escuela de Náutica de Barcelona, la Real Fábrica de San Lorenzo de la Muga en Gerona o el Hospicio de Cádiz.

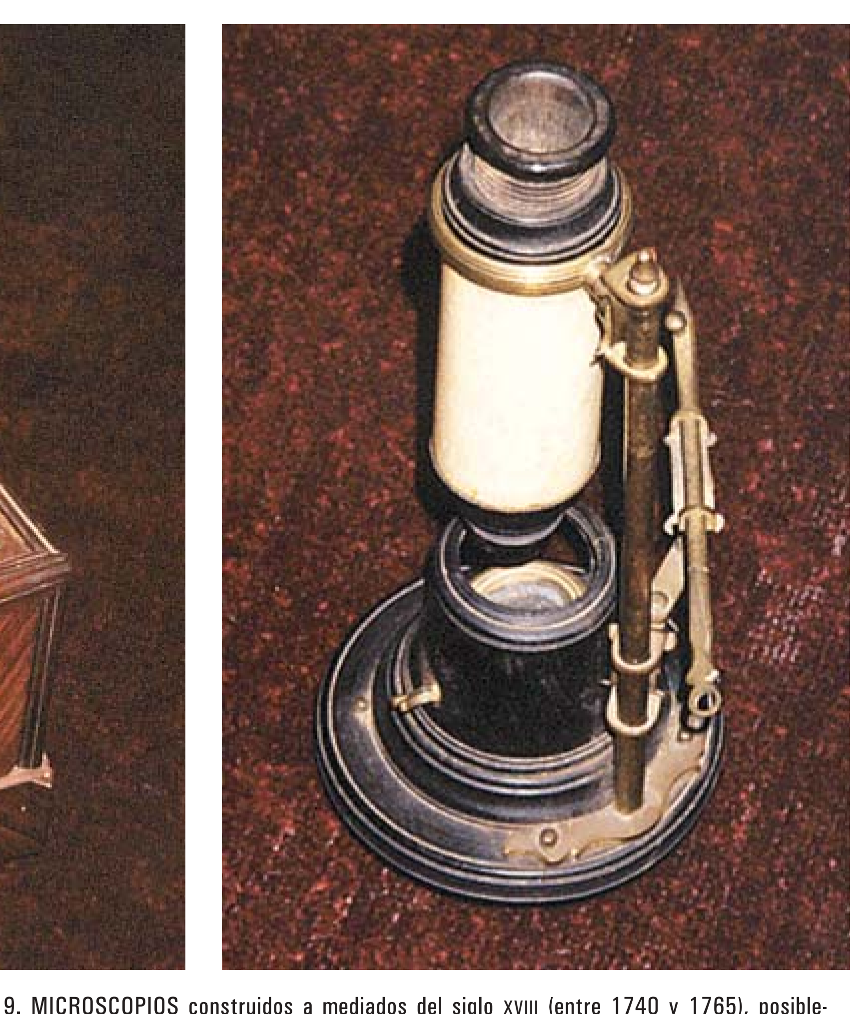
En 1786 fue nombrado académico artista el maestro carpintero Pere Gamell. Fue un prolífico creador. Inventó un grafómetro y una máquina para sacudir y limpiar el algodón. Introdujo mejoras en la máquina de agramar cáñamo y lino ideada por Francesc Santponç y Francesc Salvà en 1783. En 1787 Gamell presentó a la Academia una máquina para elevar agua de riego. Bajo la dirección de Santponç construyó, en 1788, un modelo de máquina para elevar agua en una fá-



CARLES PUIG PLA

8. PIETER VAN MUSSCHENBROECK (1692-1761), uno de los introductores de la física experimental newtoniana en Leiden. Fue el autor del *Essai de Physique*, texto que sirvió para el curso de física experimental que decidieron seguir los 16 miembros de la Conferencia físico-matemática experimental de Barcelona, fundada en 1764 y antecesora inmediata de la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de esta ciudad.





9. MICROSCOPIOS construidos a mediados del siglo XVIII (entre 1740 y 1765), posiblemente en Francia, por artesanos desconocidos e inspirados uno en un modelo tipo Marshall (*izquierda*) y otro en un tipo Culpeper (*derecha*), según se desprende de un estudio reciente realizado por Luis y Santiago Vallmitjana. La Real Conferencia Física los adquirió probablemente a través del milanés Giuseppe Castellnovo.

brica de tintes, siguiendo el método inglés de Joseph Townsed, que consistía en situar el timón por encima y no al lado del animal. En 1789 presentó un modelo de noria que pretendía corregir las pérdidas de agua de la noria habitual.

Entre los académicos artistas sobresalió también Tomás Pérez y Estala. Cerrajero de profesión, en 1776 marchó a París, donde dio muestras de su talento inventivo. Obtuvo una pensión de la Junta de Comercio de Barcelona en 1778 para ponerse al corriente de los avances en la maquinaria en Francia. En 1783, Floridablanca le encomendó tareas de inspección y asesoramiento técnico, una suerte de espionaje industrial, habitual entonces entre los pensionados españoles y de otras naciones. En 1786 negoció en Inglaterra con Wilkinson la adquisición clandestina de las piezas más importantes de tres máquinas de vapor para las minas de Almadén, de las cuales sólo una se llegó a instalar. Ese mismo año presentó a la Academia de Ciencias de Barcelona los planos de una máquina para batir indianas.

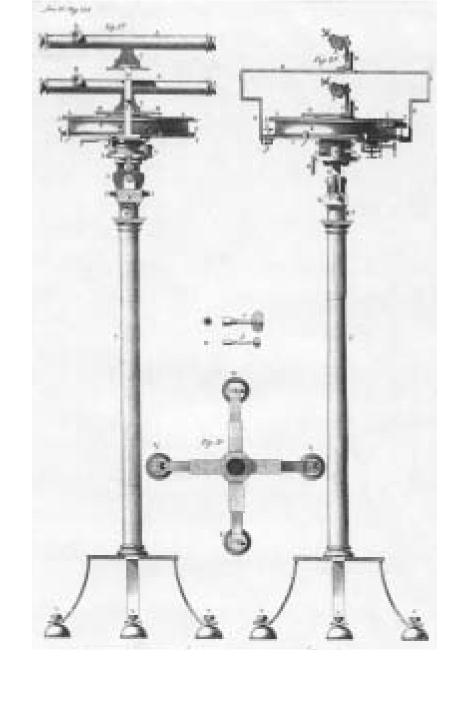
Cerrajero fue, asimismo, Gaietà Faralt, inventor de un ingenioso destornillador universal, superior al de Barlow. No había que sacar el destornillador continuamente de la cabeza del tornillo, pues contaba con un pestillo de detención que permitía que el mango retrocediese sin arrastrar consigo al tornillo y volver a imprimir el movimiento de giro y rosca. La Junta de Comercio pensionó su estancia en Madrid, en



10. PRISMAS sobre un soporte articulado para realizar experimentos de óptica. Se conservan en la Academia de Ciencias y Artes de Barcelona y proceden del Colegio que tenía la Compañía de Jesús en Calatayud antes de la expulsión de los jesuitas. La Junta municipal de dicha ciudad reservó una serie de instrumentos de aquel colegio y los puso a disposición de la Academia de Ciencias de Barcelona en 1775.

CARLES PUIG PLA; CORTESIA DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS Y ARTES DE BARCELONA

11. EL "PRECISIVO", instrumento matemático destinado a la obtención de mediciones goniométricas finas para aplicaciones geodésicas o astronómicas. Fue diseñado por el académico Agustí Canelles, que acompañó a Méchain en su expedición geodésica para la determinación de la medida del meridiano, y fue construido por Gaietà Faralt.



1779, para aprender maquinaria en la fábrica de Antonio Martínez. En 1787 la Academia lo numeró entre sus miembros. A la capital del reino volvería, pensionado de nuevo por la Junta, en 1804, ahora para copiar los diseños y modelos de máquinas realizados por Agustín de Betancourt en el Gabinete de Máquinas del Buen Retiro.

Para Agustí Canelles construyó Faralt el "precisivo", un instrumento matemático que posibilitaba la realización de mediciones goniométricas finas. (Canelles acompañó en 1804 a Pierre André Méchain en su expedición geodésica para la determinación de la medida del meridiano de París, se convirtió en un firme defensor de la utilización del metro y fue profesor de cosmología en la Academia.)

Maestro vidriero, Josep Valls fue nombrado académico artista en 1789. Destacó en la construcción de instrumentos de medición de fenómenos meteorológicos, que mejoró con la omnipresente asistencia supervisora de Salvá. Adquirió tal destreza, que de su taller salieron termómetros y barómetros para el resto de España y el extranjero.

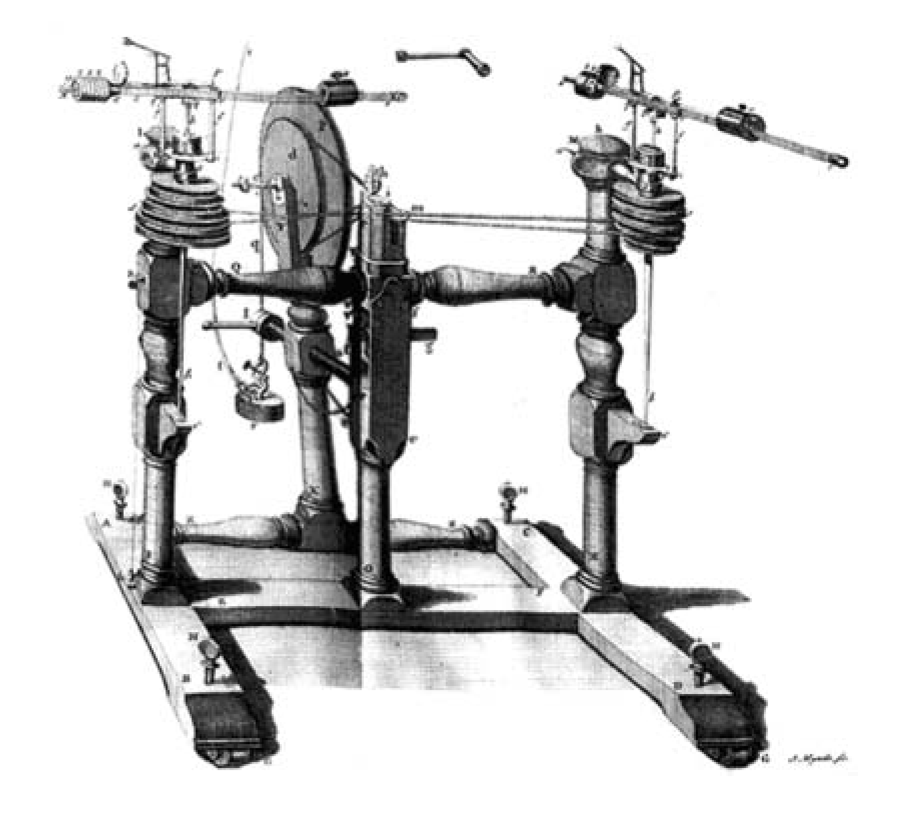
Del ramo textil procedía Antoni Regàs, maestro mediero. Instruido en matemática y mecánica, promovió un nuevo método de hilar la seda con agua fría. Inventó y fabricó tornos de hilar seda y diversas máquinas hidráulicas, agrícolas e industriales. En 1805 recibió el nombramiento de académico artista y también literario en la dirección de estática y meteorología.

Maestros torneros fueron Josep Antoni Carerac y Pelegrí Forès. El primero entró en la Academia en 1807; diez años más tarde, el segundo. Carerac había dirigido en 1805 la construcción de máquinas de emborrar, cardar, hilar y perchar lanas para las Reales Fábricas de Guadalajara. Del taller de Forès salió una colección completa de cuerpos geométricos para la enseñanza de las matemáticas y la cosmografía en la Academia. Invención suya fue, en 1820, un grifo que evitaba el derrame de líquidos y la oxidación que se producía en los de bronce.

Escuelas de formación

La mayoría de los artistas trabajaron bajo la dirección y asistencia de académicos literarios. La instrucción de los artesanos constituía una preocupación palpable en la Barcelona de la segunda mitad del siglo XVIII. La Junta Particular de Comercio creó dos escuelas técnicas, la de Náutica en 1769 y la de Nobles Artes en 1774. Esta última, muy concurrida, contribuyó a potenciar el auge experimentado en Cataluña por la industria algodonera y, más concretamente, por la fabricación y estampación de indianas.

Esa labor formativa va asociada, en su origen, a la figura de Francesc Dalmau. Discípulo del académico artista Pere Gamell, se interesó por la enseñanza pública de las matemáticas para artesanos. Dalmau había aprendido de Gamell las aplicaciones prácticas de las matemáticas. A principios de junio de 1787, se pro-



12. MAQUINA DE LAS FUERZAS CENTRALES tal como aparece en los *Mathematical Elements* de Gravesande. Desde sus inicios en 1764, la Conferencia Físico-matemática experimental requirió del trabajo de hábiles artesanos de Barcelona para poder construir diversas máquinas; entre ellas, la máquina de las fuerzas centrales.

CARLES PUIG PLA

NOMBRE	OFICIO	ADMISION
Joan González	Maestro tornero. Maquinista	1776
Pere Gamell	Maestro carpintero. Maquinista	1786
Tomás Pérez	Maquinista	1786
Gaietà Faralt	Cerrajero. Maquinista	1787
Josep Valls	Maestro vidriero. Instrumentos meteorológicos	1789
Antoni Regàs	Maestro mediero. Máquinas para la seda	1804
Josep A. Carerac	Constructor de máquinas	1807
Pelegrí Forés	Maestro tornero. Grabador	1817
Josep Ricart	Relojero	1822

puso abrir en Barcelona una *Escuela pública de Matemáticas para los artesanos en horas cómodas para ellos*. Con ese fin, acudió a la Audiencia del Principado de Cataluña solicitando permiso. Consideraba que era "verdaderamente doloroso que en una ciudad tan industriosa y comerciante como ésta no haya comodidad para que puedan los artesanos en aquellas horas que tienen reposo aplicarse en tan interesante ciencia". Su programa docente incluía una primera parte sobre cálculo numérico, fraccionario y decimal; razones y proporciones; uso de los logaritmos, geometría teórica y práctica; trigonometría y gnomótica. Se dedicaba la segunda parte al cálculo literal, cálculo radical, progresiones aritméticas y geométricas, construcción de los logaritmos, las tres secciones cónicas; el cálculo infinitesimal y varias aplicaciones de todos estos principios a diferentes partes de la matemática.

13. PORTADA DEL *Essai de Physique* de Musschenbroek. Este fue el texto de referencia para el curso de física experimental que, bajo la dirección de Josep Subiràs, discípulo del jesuita Tomàs Cerdà, acordaron seguir los fundadores de la Conferencia Físico-matemática experimental.

CARLES PUIG PLA

Dalmau obtuvo el permiso, una vez comprobada su capacitación por la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona. Estableció una clase pública para instruir a los jóvenes artesanos que continuaba abierta en febrero de 1790 cuando, como "maestro de matemática", hacía trámites para obtener la cátedra de matemática de la Real Maestranza de Granada.

Fabricantes de máquinas

Tal era el desarrollo conseguido en la manufactura que, a mediados del siglo XIX, Barcelona contaba con talleres y tiendas donde adquirir instrumentos científicos para consumo propio y la exportación. En el establecimiento de Francesc Dalmau y Faura, por ejemplo, se fabricaban anteojos y otros instrumentos ópticos, algunos de su invención; se unió con Ramon Roselló para fabricar o importar instrumentos de astronomía, náutica, agrimensura, geodesia o electricidad. Josep Clausolles construía instrumentos náuticos, ópticos y quirúrgicos; Taylor y Lowe, ópticos de Baviera, graduaban la visión y poseían una fábrica de instrumentos ópticos, como telescopios, anteojos de larga vista, microscopios, barómetros o termómetros. Josep Rosell disponía de una fábrica y almacén de instrumentos de astronomía, agrimensura, mineralogía, óptica, física, matemáticas y geodesia marina.

Había sociedades dedicadas a la fundición y obtención de hierro colado para la fabricación de maquinaria, como la de Valentí Esparó y la Sociedad del Nuevo Vulcano, entre otras.

Era el fruto maduro de un empeño nacido a mediados de la centuria precedente. La Academia de Ciencias Naturales y Artes no sólo reconoció públicamente el valor de los oficios mecánicos, sino que involucró a destacados artesanos de la ciudad en la construcción de modelos, máquinas e instrumentos científicos, imprescindibles para tener un completo conocimiento y poder asimilar la nueva ciencia experimental. Las aplicaciones prácticas de esta "ciencia útil" que defendía la Academia contribuyeron a potenciar el proceso emergente de industrialización de Cataluña.

El autor

Carles Puig Pla, profesor titular de Historia de la Ciencia en la Universidad Politécnica de Cataluña, estudió la carrera de físicas en la Universidad de Barcelona. El autor desea manifestar el agradecimiento a su colega el profesor Antoni Roca y a Rosa Maria Sarabia, bibliotecaria de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.

Bibliografía complementaria

LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS NATURALES Y ARTES EN EL SIGLO XVIII. J. Iglésies, en *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, XXXVI, 1, 1964.

NINETEENTH-CENTURY SCIENTIFIC INSTRUMENTS AND THEIR MAKERS. Dirigido por P. R. De Clercq. Rodopi B. V.; Leiden, 1985.

LA REIAL ACADÈMIA DE CIÈNCIES I ARTS DE BARCELONA ALS SEGLES XVIII I XIX. Dirigido por A. Nieto y A. Roca. Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona/Institut d'Estudis Catalans; Barcelona, 2000.

Wolfgang Bürger

La danza salvaje del plato

Escándalo en el restaurante: ¿Se ha sentido usted alguna vez ignorado por los camareros? Parece que sirvan a todos a su alrededor, menos a usted. Para remediarlo hay un método simple. Lo hemos probado con éxito más de una vez, cuando, tras una larga excursión, nos hemos sentado a la mesa con tres niños cansados y sedientos.

Pasado un tiempo de espera prudencial, agarramos un plato llano grande (aunque no llame tanto la atención, también vale uno más pequeño, y en caso de necesidad, hasta un cenicero redondo). Apartamos el mantel y ponemos el plato a girar verticalmente, de canto. Le entra la fatiga y se ladea, pero mientras va cayendo repone parte de energía cinética y, aunque resbale quizás un poco sobre la mesa, seguirá girando, sólo que ahora casi horizontalmente (*véase la figura 1*).

El giro del plato será más impresionante con la parte inferior hacia arriba, para que se pueda apoyar sobre el borde. Se verá (y oirá) girar cada vez más rápido al punto de apoyo alrededor del plato, pero el plato en sí lo hará cada vez más despacio. No cuesta comprobarlo; basta con pegar algún indicador a la base del plato o fijarse en el sello del fabricante. La resistencia a rodar sobre la mesa y la fricción del aire se esfuerzan, qué duda cabe, por dejar sin energía al inocente plato; mas, a pesar de todo, éste sacará aún fuerzas para ejecutar un *finale furioso.* La mesa sirve de buena caja de resonancia; los tumbos se oirán cada vez más altos. En las mesas vecinas nos mirarán con reprobación; pero no habrá que esperar mucho antes del gran acorde final, que convencerá hasta al camarero más duro de oído de que nos tome por fin la nota.



1. Un plato (*arriba*) que gira boca abajo encima de la mesa produce un ruido considerable, sobre todo poco antes de pararse. Aún resultan más impresionantes, pero no los va a tener a mano en un restaurante, una tapa de cubo de basura (*página siguiente a la izquierda*) o una antena parabólica que ya no se use (*página siguiente a la derecha*); ésta ni siquiera será circular, sino elipsoidal.

El disco de Euler: El número se puede llevar a cabo no sólo con platos, monedas o alianzas, sino con cualquier objeto redondo y plano. Posavasos, discos compactos y aros no causan mucha impresión. Ligeros como son, se paran pacíficamente a las pocas vueltas. Para armar el espectáculo, el objeto que gire habrá de ser pesado —dispondrá así de una gran energía potencial— y con el canto muy pulido —para que a la fricción le lleve un largo tiempo consumirla—. Un ingeniero entusiasta de los juegos, el californiano Joseph Bendik, se lo ha tomado a pecho y lo ha convertido en un juguete. Está a la venta. Se llama el "disco de Euler", en honor del gran matemático suizo que hace más de doscientos años trabajó en Basilea y en San Petersburgo y, en el intervalo, estableció los fundamentos de la teoría giroscópica. Este artefacto de color plateado, puro metal macizo con los cantos muy bien redondeados, puede girar durante dos minutos sobre una base pulida.



2. El disco de Euler, pesado y perfectamente cilíndrico, no acostumbra pasar inadvertido a la vista, con su revestimiento brillante, ni al oído, cuando gira sobre un plato de cristal plano.

ELKE REINECKE (*arriba*); JOSEPH BENDIK (*abajo*);

Las anillas giroscópicas, como los llamo yo, pertenecen a la familia del plato giroscópico. Las vi por primera vez hace muchos años, en una juguetería: se trata de cinco pequeños discos de acero con bordes de colores y un agujero en medio,





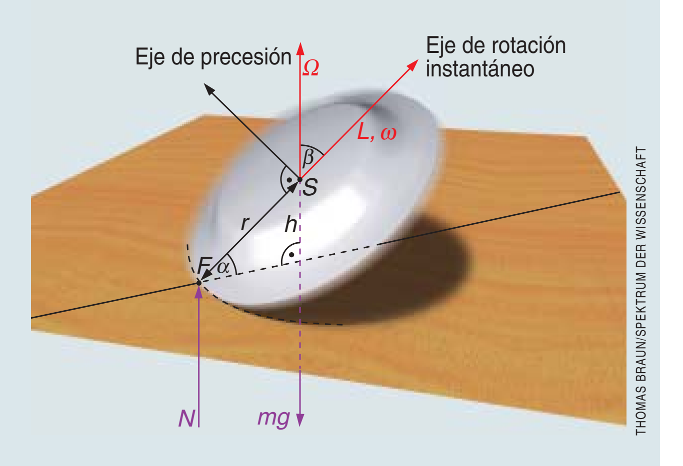
ELKE REINECKE

El punto de apoyo que rota infinitamente rápido

EN LA ESPECTACULAR FASE FINAL del giro del plato, el movimiento horizontal de su baricentro S sobre la mesa ya ha remitido y el plato gira (precesiona) alrededor del eje vertical en reposo que atraviesa *S*. El baricentro está a una altura $h = r \operatorname{sen} \alpha$ sobre el plano de la mesa (r radio, α ángulo de incidencia del plato) y baja con la ralentización del movimiento (a causa del rozamiento con la mesa y la fricción del aire), hasta que el plato se para sobre la mesa. (La aproximación hasta la mesa es demasiado compleja para estudiarla aquí.) Como veremos, en esta fase la energía total del plato es directamente proporcional a la altura h del baricentro: $E = (3/2)\, mgh$, y se reparte en proporción 1:2 entre la energía cinética y la potencial en el campo gravitatorio (m masa del plato, $g = 9{,}81$ m/s^2 aceleración de la gravedad).

Para estudiar el movimiento de rodadura a lo largo del perímetro, supondremos que el baricentro está quieto (despreciando su movimiento de caída, mucho más lento). El punto de apoyo *F*, sobre el que descansa instantáneamente el plato, se desplaza sobre la mesa, mientras que su punto opuesto en el plato se mueve por la circunferencia de éste. El radio que une *F* y *S* forma el eje de rotación instantáneo. Respecto a este eje el plato tiene un momento de inercia (aproximadamente) $A = mr^2/4$ (la fórmula sería exacta si el plato fuera un disco). Si gira alrededor del eje con una velocidad de rotación ω, tendrá un momento angular $L = A\omega$ en el sistema de referencia que se mueve con *F*. Mientras rueda sobre su borde, precesiona con una velocidad angular ω alrededor del eje vertical que atraviesa el baricentro; este eje forma un ángulo $\beta = 90^\circ - \alpha$ con la dirección del momento angular *L*. La variación temporal del vector momento angular $\vec{L}$ es el momento de fuerza $\dot{\vec{L}} = \vec{\Omega} \times \vec{L}$; cuyo módulo es $\Omega A\omega \cos \alpha$.

Por otro lado, este momento de fuerza está generado por la fuerza de apoyo N, igual y opuesta al peso mg en el punto de apoyo *F* del plato, y tiene por ello (es el producto vectorial de la palanca r de la fuerza y de la fuerza) el módulo $rmg \cos \alpha$. Igualando ambas expresiones se tiene la ecuación para el momento de fuerza $\Omega\omega A = rmg$, que tras sustituir la fórmula para A se simplifica y deviene $\Omega\omega = 4g/r$. El miembro derecho de la igualdad es una constante, independiente del movimiento.



THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ambas velocidades angulares son, pues, mutuamente inversas (cuanto más lento gira el plato, más rápidamente precesiona); pero, ¿cómo dependen del ángulo de incidencia del plato α? Para un plato muy inclinado ω y Ω coinciden; si gira casi horizontal, ω tiende a cero. Este comportamiento es parecido a $\omega = \Omega \operatorname{sen} \alpha$, lo que se corrobora al descomponer $\vec{\Omega}$ en las componentes paralela y perpendicular al plano del plato. De ello se infiere que

$$\Omega = \sqrt{\frac{4g}{r \operatorname{sen} \alpha}} \text{ y } \omega = \sqrt{\frac{4g \operatorname{sen} \alpha}{r}} \, .$$

Cuanto más horizontal sea el plato, más deprisa se moverá su punto de apoyo, a la velocidad angular Ω, por su borde y más lentamente girará alrededor del eje (en movimiento) que une el baricentro con el punto de apoyo.

¿A qué velocidad gira entonces el plato alrededor de sí mismo? Una consideración geométrica más precisa da como resultado para dicha velocidad angular el valor $\Omega\,(1 - \cos \alpha)$, que tiende a cero para $\alpha \to 0$ (en consonancia con la observación), independientemente de que Ω tienda a infinito.



3. El eje de precesión del pequeño giroscopio es tangencial al aro; en cambio, su eje de giro está inclinado unos 45 grados (*arriba*). Cuando la niña hace girar el aro, aporta continuamente energía a las anillas y mantiene así en pie su movimiento giroscópico (*abajo*).



enhebrados en un aro de acero unas diez veces mayor. La dependienta no sabía ni por dónde empezar con el artilugio. Una vez en casa, descubrí que había adquirido un maravilloso giroscopio de juguete. Supera a los platos y a los discos de Euler: las pequeñas anillas discoidales giraban sin cesar, como si se tratase de un "perpetuum mobile", ¡pero de una especie que no pone en tela de juicio los principios de la termodinámica!

Para que arranque se necesita algo de habilidad. Se da un golpe con la mano a los discos que cuelgan de la parte inferior del aro y se intenta que giren los cinco a la vez (*véase la figura 3, abajo*). Cuando se ha conseguido, lo que no siempre sucede, se debe hacer que el aro gire continuamente para que sigan dando vueltas sin moverse de su sitio, separados por pequeñas distancias unos de otros. Desde el sistema de referencia relativo del aro —que en esa zona gira hacia arriba—, los discos están cayendo; ganan, pues, una energía que compensa las pérdidas provocadas por la fricción. Si el aro no está muy limpio, puede suceder que los discos vecinos giren a diferente velocidad, choquen entre sí y se acabe la diversión.

La teoría de este juego, no tan sencilla, ya había atraído la atención hace más de treinta años. En un artículo de *Acta Mecánica,* D. J. McGill y G. J. Butson trataron el giro de anillas; no lo abordaron en varas cilíndricas curvadas circularmente, sino en varas rectas. Se puede hacer que anillas mayores giren en un palo de escoba. ¡Pruébenlo! Quizás hasta consigan, en el momento en que una anilla haya llegado abajo, dar deprisa la vuelta a la escoba para que pueda seguir girando.



Juan M.R. Parrondo

Cuestión de escala

La música y las matemáticas tienen mucho en común, especialmente en Occidente. Ya comentamos el mes pasado en esta misma sección el tratamiento matemático de la consonancia y la disonancia entre dos notas. Otro de los problemas en donde las matemáticas tienen un papel crucial es en el diseño de escalas musicales. Una escala es una serie de notas con las que se hacen las melodías de las canciones y piezas musicales que escuchamos todos los días. Pero esta serie de notas es el resultado de una evolución muy compleja, que se explica en parte por razones físicas, pero que además está jalonada por decisiones más o menos arbitrarias que tomaron músicos y constructores de instrumentos de distintas épocas.

Recordemos cuáles son los pares de notas o intervalos consonantes, es decir, los más agradables al oído y los que, por tanto, deberían encontrarse en cualquier escala musical. El más consonante de todos es la octava, el intervalo formado por dos notas de frecuencias f y $2f$. De hecho, dos notas con esas frecuencias suenan prácticamente igual y por eso en música tienen el mismo nombre. Por ejemplo, el La central del piano es un sonido que vibra 440 veces por segundo. Decimos que su frecuencia es de 440 hertz. Un sonido que vibre a 220 hertz es también un La, una octava más abajo, y otro que vibre a 880 hertz es un La una octava más arriba. Todas estas notas suenan tan parecidas, que una melodía se puede tocar en cualquier octava o en varias octavas a la vez y ser perfectamente reconocible. Otros intervalos consonantes son la quinta, que consta de dos notas cuyo cociente de frecuencias es 3/2, la cuarta, definida por un cociente igual a 4/3, la tercera mayor de 5/4, etc. Hay dos aspectos relevantes en la definición de intervalo y de intervalo consonante. En primer lugar, el intervalo entre dos notas está determinado por el cociente de sus frecuencias y no por la diferencia. En segundo lugar, los intervalos consonantes suelen estar formados por el cociente de números enteros sencillos (aunque ya vimos el mes pasado que la teoría de la consonancia es bastante más compleja). Ambos aspectos están determinados por nuestro sistema auditivo y por el modo como asignamos notas a los sonidos que escuchamos.

Diseñar una escala no es más que colocar varias notas entre una nota dada, por ejemplo el Do, y su octava superior. En la música occidental, se utiliza la llamada *escala igual temperada* o simplemente escala temperada. Aunque tiene un sencillo fundamento, dividir la octava en doce intervalos iguales, su historia es algo tortuosa. La razón es que la escala temperada es una solución aproximada a un problema matemáticamente irresoluble: cómo diseñar una escala en la que todos los intervalos sean consonantes. Veamos por qué.

Una escala que se construye a partir de intervalos consonantes es la llamada *escala justa*. La escala justa de siete notas es:

Nota	Frecuencia (con respecto al Do)
Do	1
Re	9/8 = 1,125
Mi	5/4 = 1,25
Fa	4/3 = 1,333
Sol	3/2 = 1,5
La	5/3 = 1,667
Si	15/8 = 1,875
Do	2

Se construye de modo que los principales acordes de tres notas estén formados por intervalos consonantes. Se comienza con la nota Do y se añade el Mi, una tercera mayor por encima (5/4) y el Sol, una quinta por encima (3/2). Después se construye el acorde de Sol subiendo al Si mediante una tercera mayor ($3/2 \times 5/4 = 15/8$), y al Re mediante una quinta ($3/2 \times 3/2 = 9/4$). Finalmente, se construye el acorde de Fa de modo que la tercera nota sea el Do inicial. Así, el Fa estaría una quinta por debajo del Do, es decir, su frecuencia sería de 2/3. Para colocar el Fa dentro de la escala, subimos una octava multiplicando por dos y obtenemos la frecuencia de 4/3. A partir de ese Fa subimos una tercera mayor y obtenemos el La ($4/3 \times 5/4 = 5/3$). La quinta por encima del Fa tiene una frecuencia $4/3 \times 3/2 = 2$ que es el Do de la octava superior. La escala justa tiene los tres acordes de Do, Sol y Fa perfectos, formados por intervalos completamente consonantes. Sin embargo, el intervalo entre Re y La no es una quinta, sino que vale 5/3:9/8 = 40/27 = 1,481, un valor ligeramente inferior a los 3/2 de la quinta perfecta. Esto hace que el acorde de Re suene un poco desafinado en la escala justa.

Los intervalos de quinta son tan importantes, que existe una escala construida a partir de ellos, se trata de la *escala pitagórica*. La diseñaron los pitagóricos al descubrir la consonancia y la relación matemática sencilla de la quinta y de la octava. La escala pitagórica de siete notas tiene las frecuencias siguientes:

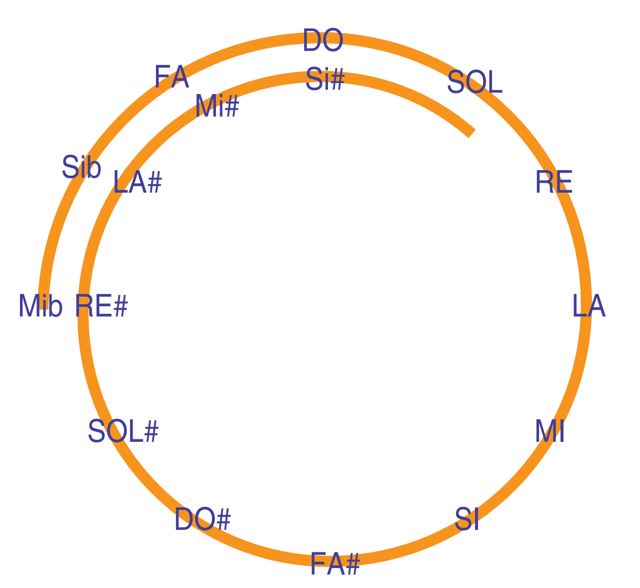
Nota	Frecuencia (con respecto al Do)
Do	1
Re	9/8 = 1,125
Mi	81/64 = 1,266
Fa	4/3 = 1,333
Sol	3/2 = 1,5
La	27/16 = 1,6875
Si	243/128 = 1,898
Do	2

Para construirla es muy útil el llamado círculo de quintas que, en realidad, es una espiral que cerraremos más tarde en forma de círculo. La figura muestra el círculo de quintas. Si lo recorremos en el sentido de las agujas del reloj, cada nota está una quinta por encima de la precedente, es decir, la frecuencia de cada nota es 3/2 de la precedente. La escala pitagórica se construye a partir del círculo "bajando" las notas tantas octavas como sea necesario para que queden dentro de la escala. Por ejemplo, la frecuencia del Re del círculo es $3/2 \times 3/2 = 9/4$, que está entre 2 y 4 y queda, por tanto, una octava por encima de nuestra escala. Bajamos dividiendo por dos (recordemos que para subir una octava tenemos que multiplicar la frecuencia por 2 y para bajarla, dividir por 2) y obtenemos los 9/8 del Re de la escala. Las notas de la escala pitagórica tienen frecuencias de la forma $(3/2)^n/2^m$, en donde n y m son números enteros; o bien, si recorremos la espiral en el sentido contrario a las agujas del reloj, $(2/3)^n \times 2^m$.

La escala pitagórica tiene algunos problemas. En primer lugar, ciertos intervalos de la escala no son consonantes. Por ejemplo, entre Do y Mi no hay una tercera mayor (5/4). En segundo lugar, la espiral nunca se cierra porque no existe ningún par de enteros n y m tales que $(3/2)^n = 2^m$, es decir, nunca se vuelve a un Do al recorrer la curva. Sin embargo, en ocasiones las notas de la espiral pasan muy cerca unas de otras. Eso ocurre, por ejemplo, cada 12 notas del círculo. En efecto, $(3/2)^{12} = 129{,}75$ es muy parecido a $2^7 = 128$. Recorrer la espiral de quintas 12 puestos hacia la derecha nos llevaría a un Si sostenido (*véase la figura*), que es prácticamente igual a un Do. El intervalo entre este Si sostenido y el Do más cercano:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} \Big/ 2^7 = \frac{3^{12}}{2^{19}} = 1{,}0136$$

es bastante pequeño, más o menos un noveno de tono y se llama *coma pitagórica*.



La espiral pitagórica de quintas es ilimitada en las dos direcciones. A lo largo de la curva, las notas están separadas siempre por una quinta. El mérito de la escala temperada consiste en cerrar la espiral en un círculo.

Los problemas de las escalas justa y pitagórica, y de muchas otras que se diseñaron en los siglos XVII y XVIII, no son excesivamente graves si se toca con ellas una pieza musical que no cambia de tonalidad. En los ejemplos que hemos visto, una pieza en Do sonará razonablemente bien en cualquier escala. Sin embargo, los músicos barrocos querían dar más riqueza a su música pasando de una tonalidad a otra a lo largo de una misma pieza. Para ello se diseñó la escala temperada, que opta por dividir la octava en 12 intervalos iguales o semitonos. Dos notas separadas por un semitono tienen frecuencias cuyo cociente es $2^{1/12}$. Si subimos 12 semitonos a partir de una nota, es decir, si multiplicamos su frecuencia por $2^{1/12}$ doce veces, habremos multiplicado por 2, es decir, habremos subido una octava. La escala temperada de siete notas viene dada por la siguiente tabla:

Nota	Frecuencia (con respecto al Do)
Do	1
Re	$2^{1/6} = 1{,}122$
Mi	$2^{1/3} = 1{,}26$
Fa	$2^{5/12} = 1{,}335$
Sol	$2^{7/12} = 1{,}498$
La	$2^{9/12} = 1{,}682$
Si	$2^{11/12} = 1{,}888$
Do	2

La escala temperada tiene también la virtud de cerrar la espiral de quintas. En ella el Si sostenido es exactamente igual que el Do, como podemos observar en el teclado de un piano. Aun así, conviene recordar que la escala temperada es una solución "de compromiso" a un problema irresoluble.

Esta es sólo una parte minúscula de la historia de las escalas. Una historia en la que han intervenido músicos y científicos como Galileo o Euler. Existe en Holanda un instituto enteramente dedicado a este tema, la Huygens-Fokker Foundation. Una de sus actividades más espectaculares consiste en el desarrollo del programa informático *Scala*, con el que se pueden diseñar escalas a partir de 11 algoritmos, entre los que se incluyen el pitagórico y el temperado. El programa dispone también de más de tres mil escalas diferentes, todas ellas utilizadas en la historia de la música occidental o en la de otras culturas.

Las escalas son también de gran importancia en la música contemporánea, que está constantemente explorando nuevos diseños, más allá de la escala temperada de 12 notas. Finalmente, para el lector interesado, recomiendo de nuevo el excelente texto de Dave Benson, *Mathematics and Music*, que se puede descargar gratuitamente en Internet. Esta obra dedica más de 70 páginas a la teoría de las escalas.

Mark Fischetti

INDICADOR VIRTUAL DEL *FIRST DOWN*

La raya fantasma

Los aficionados al fútbol americano la llaman "la línea amarilla". En las pantallas de los televisores, como si surgiera de la nada, señala hasta dónde debe avanzar el equipo atacante —al menos diez yardas— para conseguir un *first down* —que da derecho a cuatro oportunidades, o *downs*, de conseguir un nuevo avance de diez yardas—. Parece estar pintada sobre el césped: cuando varía el ángulo de la cámara, mantiene la inclinación correcta; cuando la cámara se acerca o se aleja con el zoom, se ensancha o estrecha; y cuando los jugadores corren sobre ella, desaparece bajo sus pies. Al acabar la jugada, se desvanece, para volver a materializarse cuando el equipo se dispone a empezar la siguiente.

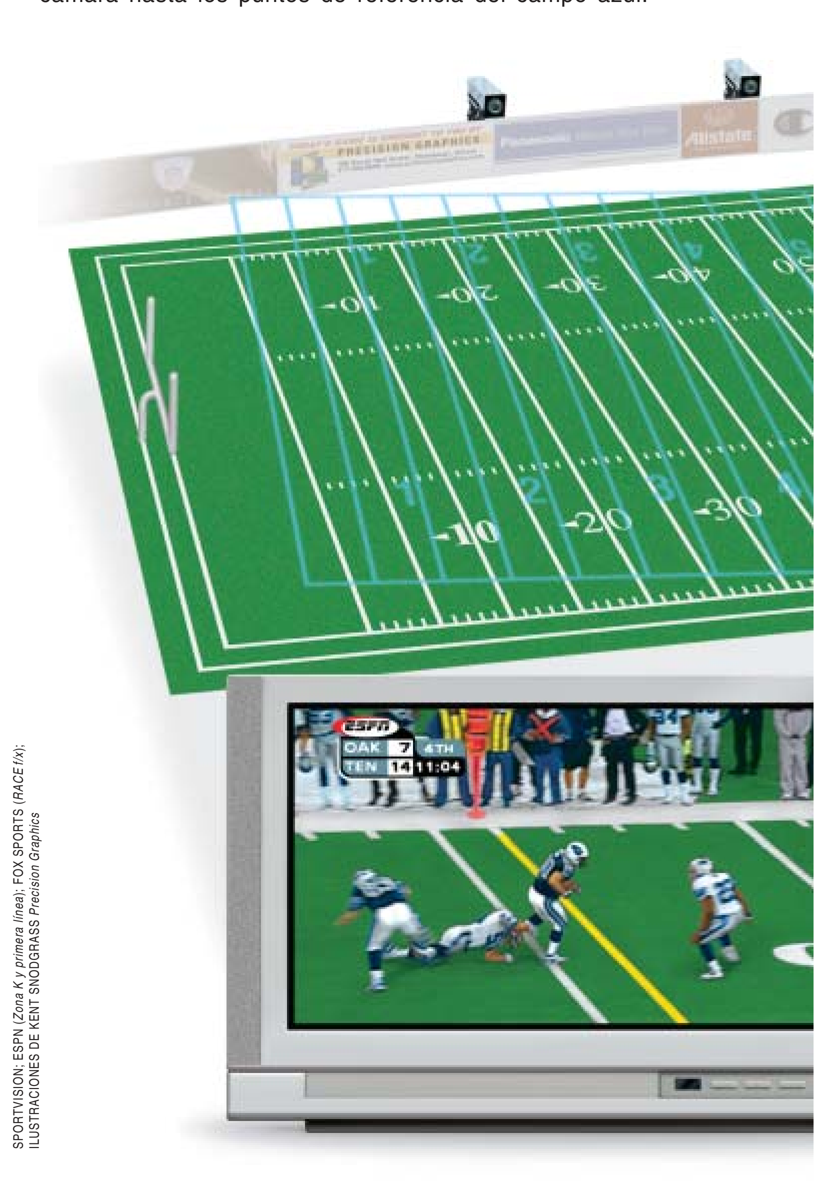
Sportvision, de Chicago, se encarga de la línea para las cadenas ESPN, ABC, Fox y Turner, y Princeton Video Image, de Lawrenceville (New Jersey), provee a CBS. Un día o dos antes del encuentro, un operador llega al estadio junto con el equipo que se ocupará de la retransmisión, y procede a levantar un mapa del campo, a calibrar las tres cámaras principales, situadas en las líneas de 25, 50 y 25 yardas, y a adaptar los programas videográficos de modo que en cada jugada se vea la fantasmagórica línea amarilla desde el momento en que se ponga en juego el balón.

Al principio, en 1998, Sportvision necesitaba cuatro personas, cinco estantes de ordenadores y toda una unidad móvil de producción de vídeo para generar la línea. Ahora les basta con medio estante de ordenadores y un operador que trabaja desde la unidad móvil ordinaria de la cadena que retransmite el partido.

El técnico ajusta la línea al indicador físico de las diez yardas, que los jueces del encuentro sitúan en la banda lateral para cada serie de downs. Pero dibujar realmente la raya es un efecto especial de gran complejidad —ha ganado múltiples premios Emmy al mérito técnico—; guarda cierta semejanza con la "pantalla azul" donde se superponen los mapas generados por ordenador de las previsiones meteorológicas. Para conseguir que esa raya amarilla parezca estar pintada en el campo, el operador depura continuamente los colores de la imagen transmitida sobre los que el ordenador debe inscribirla (los verdes de la hierba) y sobre los que no debe (epidermis y uniformes de los jugadores).

Esa es la parte más difícil: la iluminación y el estado del césped cambian constantemente durante el curso de un encuentro. No sólo cuentan los medios técnicos, sino la maña del operador.

1. ANTES DEL PARTIDO: Un teodolito láser (*centro*) traza un mapa del campo y un ordenador a bordo de la unidad móvil transforma esos datos en una cuadrícula digital (*azul*), que se envía a las tres cámaras primarias empleadas en la retransmisión. El ordenador ajusta esa cuadrícula para que encaje en las líneas de las yardas y rayas laterales auténticas, tal y como se ven a través de cada objetivo; seguidamente, calcula la distancia del centro óptico de cada cámara hasta los puntos de referencia del campo azul.



SPORTVISION; ESPN (*Zona K y primera línea*); FOX SPORTS (*RACE f/x*); ILUSTRACIONES DE KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

¿SABIA USTED QUE...?

➤ ¡*STRIKE THREE*!: Se ha aplicado el sistema de la línea amarilla al béisbol mediante una adaptación del sistema de banda amarilla del *first down*. El sistema Zona K de Sportvision recrea los lanzamientos como se verían justo tras el lanzador (*abajo, derecha*). Marca la zona de *strike* por encima de la base e inmoviliza la pelota cuando deja atrás al bateador, con lo que los espectadores pueden ver si el lanzamiento fue o no un *strike* (un lanzamiento, marrado por el bateador, que entra en la zona). Para ello, tres cámaras colocadas en las gradas siguen la pelota y calculan su trayectoria gracias a un sistema óptico de seguimiento. A los aficionados les gusta verlo; a los árbitros puede que no les haga mucha ilusión, si acaba sirviendo para criticarlos. Los carteles cambiantes que aparecen en los muretes tras la base —y los fugaces logos publicitarios que parecen estar pintados sobre los campos de fútbol americano— están creados con los mismos procedimientos de la línea amarilla, tanto por Sportvision como por Princeton Video Image.

➤ **SALPICADERO FLOTANTE:** ¿A qué velocidad corre el coche número 18 por la pista? Esta y otras informaciones aparecen repentinamente dentro de burbujas virtuales en las retrasmisiones de las carreras de la Copa Winston NASCAR de la Fox y la NBC. El sistema RACEf/x de Sportvision (*abajo, derecha*) se basa en el sistema de posicionamiento global y en dispositivos de medición inercial montados en los vehículos.

➤ **CASI EN DIRECTO:** Una transmisión "en directo" nos llega al televisor con 1,5 segundos de retraso respecto al tiempo real. Los retrasos en las transmisiones vía satélite son de un cuarto de segundo por cada enlace, hacia y desde el satélite, y la compresión de vídeo MPEG puede llevar aún más tiempo. En el fútbol americano, el procesado de las líneas amarillas añade otros 100 milisegundos. ¿Una prueba? Llévese una televisión al estadio y verá los chutes antes de que aparezcan en la pantalla.



2. CORRECCION DE LA IMAGEN: Los codificadores rastrean los movimientos de la cámara cuando ésta toma barridos panorámicos, se inclina, hace zoom y enfoca siguiendo el juego. Un clinómetro ajusta la posición de la cámara cuando el estadio cede bajo el peso de los aficionados que van llegando, y los giróscopos compensan las vibraciones del viento y las gradas. El ordenador combina esos datos, 30 veces por segundo, para determinar la perspectiva y el campo visual de cada cámara, y así situar continuamente la banda amarilla sobre la cambiante imagen de vídeo del campo.

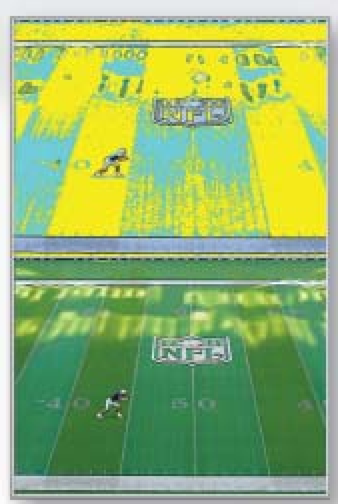


Zona K



RACEf/x

4. IMAGEN FINAL: La banda virtual se superpone a la décima de yarda más cercana. El tono amarillo puede ajustarse para que parezca yeso sobre hierba o pintura sobre césped artificial.



3. DURANTE EL JUEGO: Para parecer real, la banda debe desaparecer tras los jugadores que la crucen. En la unidad móvil, un operador decide a qué colores de píxel debe superponerse la banda y a cuáles no: cubrirá los verdes de la hierba, pero no los tonos epidérmicos ni los colores de los uniformes. Como el sol, las nubes, la iluminación del estadio y la fangosidad del campo varían durante el partido, el operador altera la paleta minuto a minuto; en este ejemplo, seleccionará azules que se complementen con amarillos para cubrir mejor las zonas del césped que se ven de verde descolorido por la luz solar.

LIBROS

Ciencia antigua

Nuevas herramientas avalan viejas soluciones

ANAXIMANDER IN CONTEXT. NEW STUDIES IN THE ORIGINS OF GREEK PHILOSOPHY, por Dirk L. Couprie, Robert Hahn y Gerard Naddaf. State University of New York Press; Albany, 2003.

GREEK SCIENCE OF THE HELLENISTIC ERA. A SOURCEBOOK, por Georgia L. Irby-Massie y Paul T. Keyser. Routledge; Londres, 2002.

THE PROPORTIONS IN ARISTOTLE'S *PHYS*. 7.5, por Theokritos Kouremenos. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2002. EXPERIENTIA. X COLLOQUIO INTERNAZIONALE. Dirigido por Marco Veneziani. Leo S. Olschki Editore; Florencia; Florencia, 2002.

LES CINQ SENS DANS LA MÉDECINE DE L'ÉPOQUE IMPÉRIALE: SOURCES ET DÉVELOPPPMENTS. Dirigido por Isabelle Boehm et Pascal Luccioni. Centre d'Études et de Recherches sur l'Occident Romain de l'Université de Lyon 3; Lyon, 2003.

THE NATURAL HISTORY OF POMPEII. Dirigido por Wilhelmina Feemster Jashemski y Frederick G. Meyer. Cambridge University Press; Cambridge, 2002.

Nos habíamos acostumbrado a interpretar los pasos aurorales de la ciencia de la antigüedad clásica a través del análisis filológico de los fragmentos transmitidos por los doxógrafos. La criba textual, sin embargo, hace años que revela signos de agotamiento. ¿Sabemos ya cuanto puede conocerse sobre los presocráticos? Cuando ese interrogante parecía merecer una respuesta positiva, la incorporación de nuevas herramientas en la exégesis acaba de dar un vuelco a la situación. Desde la arquitectura (*Anaximander in Context*), por ejemplo, la cosmología griega adquiere una nueva perspectiva.

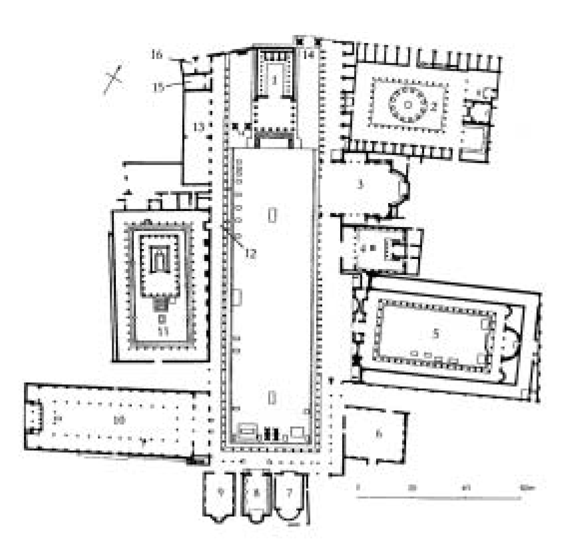
Lo mismo que Tales (c. 625-545 a.C.), a quien se reputa fundador del planteamiento racional ante la naturaleza y el hombre, Anaximandro (610-546 a.C.) procede de Mileto, la ciudad que abre el mundo heleno a la ciencia merced a su estrecha conexión con Egipto. En el siglo séptimo, los mercenarios milesios restablecieron en el trono al faraón Psamtik, quien en pago les autorizó el establecimiento de una colonia mercantil en Naucratis, en el delta del Nilo. Adquiere así verosimilitud histórica que Tales midiera, según se afirma, la altura de una pirámide e incluso que introdujera en Grecia la ciencia de la geometría.

De Egipto depende también Anaximandro. Viajero incansable, considera a ese país el centro del universo, cuna de la humanidad y crisol de la civilización. Lo pone de manifiesto en su reconstrucción del famoso mapa de la *oikoumene* o mundo habitado. Además de su escrito *Sobre la naturaleza,* relató la historia del cosmos, desde los orígenes, exentos de mitos, hasta su tiempo.

Cuando no se había esbozado todavía ninguna teoría astronómica, ni había, por consiguiente, medios instrumentales, Anaximandro imaginó la forma y el tamaño del cosmos en analogía con lo observado en las construcciones arquitectónicas de Dídima, Efeso y Samos. La arquitectura jónica contemporánea reflejaba las enseñanzas recibidas en Egipto, aunque reelaboradas con criterios propios. Los templos dípteros griegos, en efecto, no sólo difieren de los egipcios en la forma sino también en las proporciones y los números. Se trazaban de acuerdo con un proyecto, la *syngraphé*. Cuando Anaximandro detalla la estructura del cosmos espeja, en palabras y números, la *syngraphé* del arquitecto. La suya es una *syngraphé* cósmica. De sus palabras cabe, además, colegir tres hipótesis innovadoras: a) que los cuerpos celestes desarrollaban ciclos completos y, por tanto, pasaban por debajo de la Tierra; b) que la Tierra se halla suspendida libre en el centro del universo; c) que los cuerpos celestes yacen uno bajo otro. Anaximandro entiende el cosmos como un ser vivo, capaz de desarrollo...

En biología, donde rigen los mismos procesos naturales que considerará en su cosmología, sostiene que los organismos emergieron de una suerte de mezcla húmeda o barro avivado por el calor solar tras la formación inicial del universo. Defendía, pues, la generación espontánea y, también, la transformación de unas especies en otras, inducida en numerosas ocasiones por los cambios climáticos. El propio hombre habría aparecido de un animal marino anterior; de un plumazo sacaba de la explicación racional las versiones mitológicas de Pandora y Prometeo sobre los orígenes de la mujer y el varón.

Del legado presocrático, es decir, del fecundo despliegue de la ciencia clásica, se ocupa en espléndida selección de textos *Greek Science of the Hellenistic Era*, que abarca desde el 320 a.C. hasta el 230 d.C. Viene a sustituir la meritoria compilación de Cohen y Drabkin, en que se iniciaron las levas españolas de los sesenta del siglo pasado. La paulatina configuración de las distintas disciplinas —de la astronomía y la matemática hasta la medicina y la psicología pasando por la mecánica, la alquimia o la pneumática— se suceden enmarcadas en su trasfondo social y técnico, con un perfil escueto y riguroso de





JULIAN WHITTLESEY FOUNDATION (*fotografía*)

1. Pompeya. Plano del foro y edificios adyacentes: (1) templo de Júpiter, Juno y Minerva; (2) mercado (Macellum); (3) santuario de los lares públicos; (4) templo de Vespasiano; (5) edificio de Eumachia (6) comicio; (7-9) edificios públicos; (10) basílica; (11) templo de Apolo; (12) control de pesos y medidas; (13) edificios del mercado; (14) arcos conmemorativos; (15) letrinas públicas; (16) tesoro de la ciudad. Vista aérea (*derecha*).

sus creadores, que hicieron propia la declaración aristotélica del comienzo de los *Metafísicos*: “toda persona ansía por naturaleza conocer”.

Euclides se encarga de convertir la matemática en un sistema lógico-deductivo, en el que la longitud constituye la magnitud fundamental para representar figuras geométricas y números. Acorde con ello, se abordan las dificultades que rodean al postulado de las paralelas; se rechazan los infinitesimales; las longitudes irracionales (la diagonal del cuadrado unidad) se trataron como un caso distinto de las longitudes racionales. Abundan las especulaciones sobre la duplicación del cubo, la cuadratura del círculo y las propiedades de la parábola y otras curvas.

Partiendo de la regularidad del cosmos, asentada la hipótesis geocéntrica y admitida la concepción de una tierra esférica, se investigan las consecuencias a extraer de esos principios. Se produce un tránsito decisivo desde un primer modelo de esferas concéntricas a otro más domeñable de órbitas circulares. Amén del interés teórico por conocer el curso del firmamento, importaba asegurar un punto de referencia para los complicados calendarios lunisolares griegos. Desde la época de Hiparco podían predecirse fiablemente los eclipses lunares. El gradual conocimiento de las posiciones planetarias culminó con las tablas de Ptolomeo. (Junto a esa actividad racional persistía una tradición de astrología que atribuía a los astros una influencia determinante en los sucesos humanos.)

Del cosmos a la Tierra. El horizonte geográfico se ensanchó con las conquistas de Alejandro. Pero los cartógrafos tardarían algún tiempo en aplicar las proyecciones geométricas sobre un plano. Se atendió también al problema de la determinación de la latitud (expresada en términos de días más largos y más cortos) e incluso el de la longitud. La influencia de la latitud y otros factores geográficos sobre el carácter local de las plantas, animales y personas siguió siendo del mayor interés. Grecia continuaba siendo el medio central entre dos extremos.

A través de la geometría se acercaron los griegos al estudio de la mecánica, óptica, hidrostática y pneumática. Buscaban la resolución de las paradojas que les presentaba la vida diaria; así, el movimiento de grandes pesos por fuerzas pequeñas y el enorme efecto de impacto producido por cuerpos mínimos. ¿A qué se debían las ilusiones ópticas? ¿En qué consistía ver? Investigaron la naturaleza y el papel del vacío en los fluidos y aplicaron su arte al abastecimiento de agua o la flotación de las naves. Para dar cuenta de la transformación de la materia se apoyaban en el modelo de los cuatro elementos. El color y otras propiedades, cualidades secundarias mutables, dependían de su composición elemental.

Los griegos del período aquí comprendido elevaron la biología y la medicina al rango de rigurosas disciplinas científicas. En su descripción objetiva de los organismos abogaron por la generación espontánea de plantas y animales inferiores. Más allá de fábulas y alegorías, el comportamiento de los animales, cuyo grado de inteligencia se discutía, tendía a asimilarse en varios aspectos a nuestra conducta humana. Se igualaban, empero, en la salud y en la enfermedad. La primera se mantenía con el equilibrio de los cuatro “humores”, cuya ruptura pro-

Farmacología judía

PRÁCTICA DE JOHANNES DE PARMA. UN TRATADO FARMACOLÓGICO EN SUS VERSIONES HEBREAS Y CATALANA, por Lola Ferré Cano. Universidad de Granada; Granada, 2002.

La Universidad de Granada ha publicado en su colección "Biblioteca de Humanidades" la *Práctica de Johannes de Parma. Un tratado farmacológico en sus versiones hebreas y catalana*, de Lola Ferré Cano, profesora allí en del departamento de estudios semíticos. La obra contiene las versiones hebreas y catalana de un texto latino que en un principio se atribuyó a Arnau de Vilanova, pero que las investigaciones de la autora han podido demostrar que se debe a la mano de Johannes de Parma.

La historia de la ciencia dispone de pocos datos biográficos de este autor, sólo unas líneas en las obra de Max Neuburger y Julius Pagel (*Handbuch der Geschichte der Medizin*, 1902) quienes lo sitúan a mediados del siglo XIV (1348-1365) en Prato, zona nororiental de la Toscana, y que fue contemporáneo de Guy de Chauliac (1300-1368). Sarton, en su *Introduction of History of Science* (1931) dice que Giovanni de Parma fue, probablemente, franciscano, y que escribió un tratadito de medicina, titulado *Practicella*, que fue estudiada y reproducida en Leipzig en 1918 por Moritz Arndt Mehner. No obstante, hubo otros Johannes de Parma posteriores, lo que nos da una idea de la dificultad que se tiene, a veces, para identificar personajes de épocas pasadas.

Lola Ferré incluye en el libro una presentación, un estudio que aborda la autoría, la obra, distintos comentarios sobre las diversas traducciones y versiones, una comparación de los textos entre sí, así como consideraciones sobre el léxico hebreo-español de términos técnicos elaborado por la autora en el contexto de un proyecto conjunto con los profesores Gerrit Bos, de Colonia, y Guido Mensching, de Berlín (*Middle Hebrew Medical Texts with Romance and Latin Elements*). A continuación se incluyen ambos capítulos traducidos al inglés, seguidos de una breve bibliografía.

El libro contiene también la traducción de Abraham Abigdor (que incluye la latina y la castellana), que fue la que más se difundió, la traducción de Todros Moseh Bondia de la Biblioteca Vaticana, la traducción anónima que se conserva en la Biblioteca Nacional de París, y la catalana anónima, seguida de un léxico hebreo español y de otro de términos técnicos. Un hecho interesante es que cada una de las traducciones parece que procede de fuentes distintas.

El estudio de Lola Ferré es de tipo filológico y aclara bien cómo los términos pasan de una lengua a otra y cómo se van constituyendo los léxicos farmacológicos. No se le escapa el hecho de que este texto fuera traducido al hebreo, al catalán y, posiblemente, a otras lenguas, lo que nos hace suponer que la obrita tuvo su importancia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que libros como éste, de origen extraacadémico, tuvieron gran difusión entre los estratos medios urbanos preburgueses. Se trata de obras que contienen información sobre remedios tanto simples como compuestos para curar enfermedades o para evacuar los humores responsables de las mismas, así como el modo de emplearlas. Su utilidad, pues, no puede ponerse en duda.

Lo mismo sucedió en el mundo académico, donde los textos de materia médica, especialmente los antidotarios, eran muy apreciados y gozaban de amplia difusión. Todos ellos, sin embargo, conservaron el saber de la antigüedad clásica enriquecido por el helenismo alejandrino y el helenismo romano, especialmente por las figuras de Dioscórides y Galeno, las aportaciones de Bizancio y del Islam, así como las de la medicina monástica medieval y de otras corrientes que no mencionamos.

Los estudios filológicos siempre han gozado de gran prestigio entre los historiadores de la medicina. Una buena parte de su utilidad se ve reflejada precisamente en el espinoso estudio de obras de tipo farmacológico o terapéutico que siempre han sido evitadas por su gran complejidad. El estudio que nos presenta Lola Ferré es ejemplar y de un gran rigor y pone a disposición de otros especialistas una fuente valiosa que podrán analizar desde otros puntos de vista.

JOSÉ LUIS FRESQUET
Universidad de Valencia

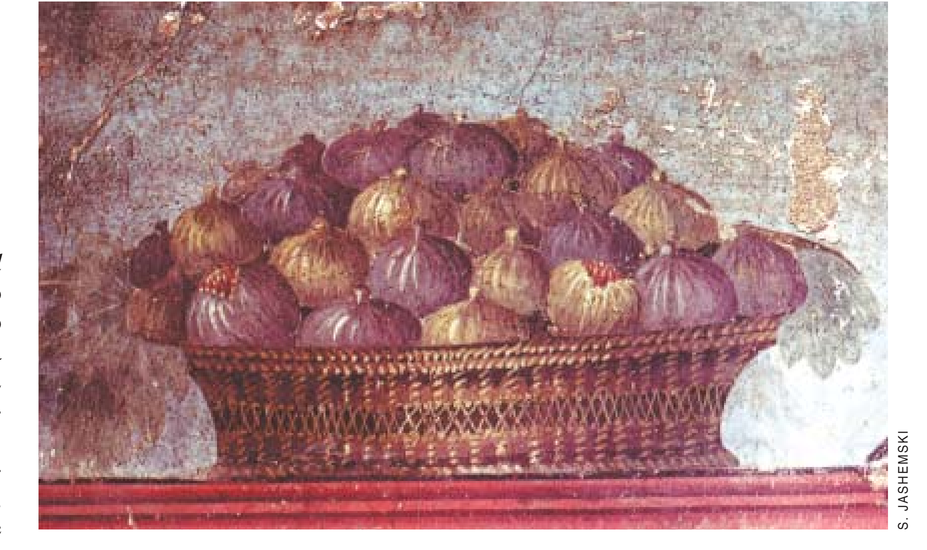
vocaba el estado morboso y cuyo restablecimiento debía partir del régimen y los fármacos, simples o mixtos. Según la adhesión que se prestara a los principios racionales ("dogmáticos") o a la práctica experimentada ("empíricos"), con vías intermedias, se dividieron las escuelas médicas. La introducción del pulso en el diagnóstico y la disección se numeran entre los avances importantes.

Con las cuatro causas, el concepto básico de toda explicación científica de la naturaleza en general o del hombre en particular era el de movimiento o cambio. En razón del mismo separaba Aristóteles (335 a.C.) los seres inertes de los vivos; aquéllos se movían por un agente exterior, éstos por un principio intrínseco (*The proportions in Aristotle's Phys*. 7.5). El movimiento aparecía en diversos diálogos de Platón (365 a.C.), vinculado al primer motor celeste (*Político*), a la esencia de la naturaleza del mundo (*Teeteto*) o su perfección en el de rotación (*Timeo, Leyes*).

Aristóteles, que dedicó al movimiento de los animales dos tratados menores, reduce todo movimiento local a movimiento violento y a dos movimientos naturales simples: lineal y circular (*De aelo, Physicorum*). El movimiento natural infralunar es lineal y su velocidad es proporcional a su peso (*De caelo*), mientras que el movimiento violento tiene una velocidad inversamente proporcional a su peso (*Phys*. 7.5). El movimiento a través de un medio (aire o agua) porta una velocidad que es proporcional al espesor del medio, por lo que no existe el vacío.

Siquiera sea como aproximaciones matemáticas, sin rango de ley, Aristóteles recurre a las proporciones entre el agente y el objeto movido para cuantificar el movimiento violento. De acuerdo con el pensamiento aristotélico, esquematizado por Theokritos Kouremenos, si un agente motor A obliga a un objeto movido B a recorrer una distancia d en un tiempo t, se mantienen las siguientes proporciones: A mueve

2. Cesta de higos. Mural del triclinium, Villa de Poppaea, Oplontis.


S. JASHEMSKI

B/2 a lo largo de una distancia 2*d* en un tiempo *t*; *A* mueve *B*/2 a lo largo de una distancia *d* en un tiempo *t*/2; *A* mueve *B* a lo largo de una distancia *d*/2 en un tiempo *t*/2, y *A*/2 mueve *B*/2 a lo largo de una distancia *d* en un tiempo *t*.

Por lo que concierne al movimiento de los cuerpos celestes, Aristóteles rechaza la hipótesis de que el primer motor sea un cuerpo material finito. Restringe al lineal el movimiento natural del mundo sublunar. Y admite que, cuanto mayor es la magnitud de un elemento sublunar, más rápido será su movimiento natural. La velocidad del movimiento natural depende también de la resistencia del elemento a través del cual el cuerpo se traslada. Pero en Aristóteles la acción y reacción no son siempre iguales y opuestas; a veces el agente motor sufre un cambio mayor que el cambio contrario que provoca.

Que no apuntale su teoría del movimiento con una ley matemática no empece que, en la perspectiva aristotélica, la ciencia sea un conocimiento demostrativo y cierto (*episteme*), que tiene por objeto lo universal, lo que es por necesidad, no lo particular y contingente, ámbito de la *empeiría*. La ciencia es conocimiento de las causas, del por qué de las cosas (*ti dioti*), y es definición de la esencia (*ousía*), a través del género próximo y la diferencia específica. La *empeiría* aporta, sin embargo, una contribución decisiva a la ciencia a través del procedimiento de la inducción y a través del ejercicio de la facultad de la memoria de impresiones sensibles pasadas (*Experientia. X Colloquio Internazionale*). La *empeiría* es, al propio tiempo, la base, la condición, lo mismo de la ciencia (conocimiento racional teórico), que del arte (conocimiento racional poyético). En los *Analíticos segundos* Aristóteles atribuye a la experiencia un papel constructivo en relación a la ciencia y al arte, puesto que consiste en un acopio de actos rememoradores, un conjunto de recuerdos de percepciones sensibles anteriores; en efecto, la memoria —y por ende la experiencia— se basa en la repetición de determinadas situaciones.

El término griego *empeiría* y su equivalente latino *experientia* derivan de la raíz verbal indoeuropea *per*-, que expresa la noción de “intentar”, “arriesgarse”. En esta raíz *per*- se unen las dos familias lexicales griega y latina, de *peira* y de *perior*, cuyos significados giran en torno a la noción de “intento, poner a prueba, ensayar”, sin prima-


S. JASHEMSKI

3. Mosaico Nilótico, casa del Fauno, Pompeya.

ria relación con la noción moderna de "demostración rotunda". La acepción de experiencia como "ensayo, intento" es la que guarda connotación con la filosofía de Aristóteles. En su doctrina, el arte y la ciencia no son inmanentes, sino que vienen suscitados por la sensación. A través de la repetición de los actos, los recuerdos se van fijando hasta constituir primero la experiencia y luego el conocimiento. La sensación se halla conectada al universal mediante la memoria y la experiencia. En una primera fase se encuentra el que percibe con los sentidos (*o aisthesin ehon*); viene luego el que no es ignaro del todo (*empeiros*); en tercer lugar el técnico y el artesano (*o technites, o heirotechnites*); en cuarto lugar el jefe de obra, el arquitecto o ingeniero (*o architekton*); por último, el que tiene competencia teórica (*ai theoretikai*).

La red del conocimiento

The Web od Knowledge. A festschrift in Honor of Eugene Garfield. Dirigido por Blaise Cronin y Helen Barsky Atkins. ASIS Monographic Series. Information Today, Inc., Nueva Jersey, 2000.

Para los profesionales de la investigación científica y docencia superior, los acrónimos SCI (*Science Citation Index*) y FI (factor de impacto) han pasado a ser parte esencial de nuestras vidas. Allí donde se requiere una valoración comparativa de nuestra actividad profesional, ya sea para distribuir recursos de investigación o resolver concursos de mérito para provisión de plazas, el SCI suministra a evaluadores reduccionistas, criterios inapelables de evaluación: Tantos *impactos* tienes —es decir, tanto suman los factores de impacto de las revistas en que publicas— tanto vales. Y eso, pese a las advertencias de Eugene Garfield en contra del uso del factor de impacto en la evaluación individual. Pero, más allá de esta inquietante vertiente evaluadora, las aportaciones de Garfield a la ciencia de la información son de tal calibre que, huérfanos de ellas, no cabría la existencia de buen número de grupos de investigación en bibliometría y cienciometría distribuidos por todo el mundo. Buena prueba de esta deuda científica es el festival académico jubilar objeto de este comentario.

Garfield se inició en la comunicación e información científica en 1951, cuando se incorporó al proyecto Welch de la Universidad Johns Hopkins para estudiar nuevos métodos de indización (indexación) y recuperación de información de la bibliografía biomédica. Este proyecto, patrocinado por la Biblioteca Médica de la Armada, precursora de la Biblioteca Nacional de Medicina estadounidense, habría de conducir más tarde al desarrollo de herramientas tan populares y útiles como el *Index Medicus* y *MEDLINE*. La experiencia y conocimiento adquirido en el proyecto Welch, unido a su olfato empresarial, sentaron las bases para las dos aventuras emprendidas por Garfield: el descubrimiento (*dis*covery) de la información científicas a través de los contenidos de las revistas y la recuperación (*re*covery) de la información, mediante los índices de citas. De la "Current list of medical literatura" que por aquel entonces editaba la Biblioteca Médica de la Armada, Garfield percibió la importancia de acortar el tiempo de elaboración, de manera que los profesionales pudieran disponer de los contenidos de las revistas de especialidad en el plazo mas corto posible, sustituyendo la laboriosa mecanografía por la fotocopia reducida de los contenidos. Así surgieron los Current Contents y el Institute for Scientific Information (ISI), que preside toda la actividad empresarial de Garfield en el campo de la información científica.

La otra gran idea innovadora de Garfield fue puesta de manifiesto en su renombrado artículo "Citation Indexes for Science" en el que propuso un sistema de indización mediante códigos numéricos sencillos y susceptibles de mecanización informática, que identifican cada artículo publicado por cada una de las revistas consideradas. Además, cada artículo indexado se acompaña de una relación códigos correspondientes a los artículos citados en él, de forma que se puede establecer una red de asociación de un gran valor documental (documentario).

En 1958, el interés de Joshua Lederberg, condujo a la producción del Genetics Citation Index con subvención de la sección de genética del Instituto Nacional de la Salud norteamericano (NIH).

Sin embargo, la negativa del NIH a financiar un índice multidisciplinar, condujo a la publicación regular del Science Citation Index por la propia empresa creada por Garfield (ISI), a partir de 1964. Desde entonces, el SCI se ha mostrado como un valioso instrumento para navegar por la bibliografía científica y trazar las raíces históricas de cualquier avance en el conocimiento. La robusta base de datos SCI proporciona elementos objetivos y cuantitativos para analizar los flujos de información en la comunicación científica, habiendo promocionado el nacimiento de la cienciometría como disciplina científica. Los datos del SCI se utilizan por científicos de la información, gestores de investigación y políticos de la ciencia para analizar los flujos lineales de comunicación, que permiten comparar naciones, instituciones, departamentos o grupos de investigación por su productividad e impacto en distintos campos, disciplinas o especialidades. También los sociólogos e historiadores de la ciencia se benefician de la información suministrada por el SCI para explorar los procesos y fenómenos asociados al desarrollo de las ideas científicas. Finalmente, los editores de las revistas científicas obtienen del SCI datos acerca del impacto relativo de sus publicaciones, con fines obvios de mercadotecnia, y también criterios para la toma de decisión en cuanto al lanzamiento de nuevas publicaciones en un determinado campo de conocimiento.

Todos estos temas son tratados en "La Web del conocimiento", a lo largo de 25 capítulos, agrupados en 5 secciones, en las que se analiza la obra de Garfield en una perspectiva histórica, la bibliografía científica, las conexiones internacionales, la cienciometría y el análisis de redes sociales. De entre los 37 autores seleccionados destacan figuras prominentes del campo de las ciencias de la información, sociología de la ciencia y cienciometría. Mención aparte merece el artículo del profesor Jonathen R. Cole, de la Universidad de Columbia ("A short history of the use of citations as measure of the impact of scientific and scholarly work "), que debiera ser de obligada lectura para todos aquellos evaluadores burocratizados que basan sus baremos individuales en una numerología de citas e impactos, que sólo tiene sentido en agregados estadísticos.

—Angel Pestaña



S. JASHEMSKI

4. Perro guardián con collar adornado con piedras preciosas. Mural de la posada de Sotericus, Pompeya.

La importancia del conocimiento aportado por los sentidos cobra particular significación en el campo de la medicina (*Les Cinq Sens dans la Médecine de l'Époque Impériale*). Siete distinguía Hipócrates, con su respectiva función, en su tratado *Sobre el régimen*: "La sensación del hombre se produce también gracias a siete estructuras diferentes: el oído (*akoe*) para el ruido, la vista (*opsis*) para lo que es visible, la nariz (*rhines*) para el olor, la lengua (*glossa*) para el gusto, la boca (*stoma*) para la conversación, el cuerpo (*soma*) para el tacto, los canales externos e internos (*diexodoi*) para el flujo cálido o frío. Gracias a esto el hombre tiene conocimiento". Su reducción a los cinco clásicos constituye un ejemplo arquetípico de la influencia del vocabulario y la reflexión filosófica en el progreso de la medicina, en este caso gracias, una vez más, a Aristóteles.

Para designar los órganos de los sentidos, Hipócrates no utiliza la palabra *organa*, sino *schemata*. Para Jouanna, eso se debería a que el tratado pertenece a la época prearistotélica y a que las partes del cuerpo en los tratados antiguos de la *Colección hipocrática* son aprehendidas por su forma, no por su función. Los diferentes *schemata* se conciben como canales a través de los cuales las diversas impresiones llegadas del exterior penetran en el alma. Aristóteles acuña los cinco órganos (*organa*): *opsin* (vista), *akoen* (oído), *osphresin* (olfato), *geusin* (tacto), *aphen* (tacto). Posteriormente aparecerá *horasis* en sustitución de *opsis*.

En su tratado *Contra Lycos*, Galeno recoge el número y la designación de origen aristotélico. Su medicina, lo mismo que la hipocrática de la que se reclama seguidor, reivindica el estatuto de ciencia racional, fundada sobre la observación de los hechos y orientada hacia la búsqueda de las causas. En esta perspectiva, y en ausencia de cualquier otra herramienta de investigación segura, el testimonio de los sentidos constituye el primer garante de la fiabilidad de la exploración. Inscribe incluso la sensación en su definición de la enfermedad: "lesión sensible de la función". Por función (*energeia*) entiende la facultad que posee el cuerpo o una de sus partes para realizar una acción.

Por importantes que sean los sentidos para el descubrimiento de una patología en el hombre, no pueden equipararse a su alcance en medicina veterinaria. A la postre, el clínico puede apoyarse en las palabras del enfermo que le explica lo que le duele; pero el veterinario carece de ese apoyo. Ciertas manifestaciones de la enfermedad son fáciles de reconocer: tos, delgadez, pérdida del apetito; hay otras que, si bien indispensables para el diagnóstico, resultan más difíciles de percibir, como la fiebre o el dolor. En ese contexto adquiere sumo interés la confección de un corpus de conocimientos empíricos que se van acumulando en los famosos tratados *de arte veterinaria*.

Si la arquitectura monumental ayuda a entender la cosmología presocrática, el *experimentum crucis* de la fiabilidad de las descripciones de Plinio el Viejo (23/24-79 d.C.), que permite, asimismo, delimitar con exactitud el organismo aludido, se ha presentado con el análisis de los efectos de la erupción volcánica del Vesubio en el año 79 d.C. (*The Natural History of Pompeii*). El súbito recubrimiento de lava de las ciudades de Pompeya y Herculano, con las villas aledañas, puso a resguardo una plétora de pruebas que ha permitido reconstruir la historia natural de la zona de influencia del volcán. En particular: contrastar la *Historia Natural* de Plinio con lo encontrado en sedimentos, muros, mosaicos, objetos ornamentales y demás. En ese afán han colaborado geólogos, edafólogos, paleobotánicos, químicos, dendrocronólogos, paleontólogos y zoólogos.

Sabido es que la enciclopedia pliniana consta de 37 libros, que pasan revista, en orden secuencial, a la cosmología, geografía, hombre, mamíferos y reptiles, peces y otros animales marinos, aves, insectos, plantas, fármacos y minerales. Desde el Renacimiento hasta muy avanzada la segunda mitad del siglo pasado, la labor de acarreo que caracteriza su obra obscureció su finura en la selección y sus propias aportaciones. Pero desde el congreso internacional que se le dedicó en su Como natal con motivo del 1900 aniversario de su muerte, la historia se ha tornado más equilibrada en sus juicios.

Plinio conocía la zona. (En el momento de la erupción, de la que cayó víctima, estaba al frente de la escuadra romana anclada en Misenum.) Recoge en su *Historia natural* numerosas especies vegetales, endémicas y aclimatadas, de los jardines y agro de la Campania. Para corroborarlo, el equipo dirigido por Wilhelmina Feemster Jashemski investigó los sedimentos del lago Averno y descubrió núcleos intactos de especímenes vegetales. Se recogieron muestras de la flora desde 2000 años a.C. hasta nuestros días, pasando por el período romano. Se obtuvo, además, una completa estatificación de conchas marinas, moluscos, foraminíferos, ostrácodos y diatomeas. El análisis complementario de jardines desenterrados y paredes pintadas con escenas de la vida diaria, ha permitido corroborar la acuidad observacional de Plinio.

—Luis Alonso

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Todo o nada

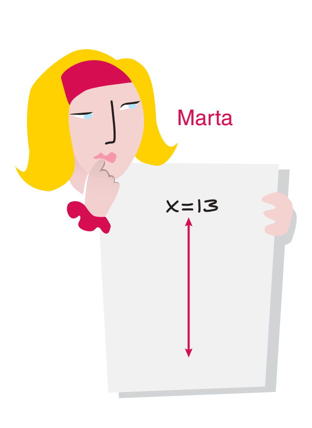
Cualquier mensaje puede representarse en forma numérica. Por ejemplo, conforme al código ASCII de los ordenadores, la representación de la palabra "teme" sería —escrita en forma decimal— 116 101 109 101.

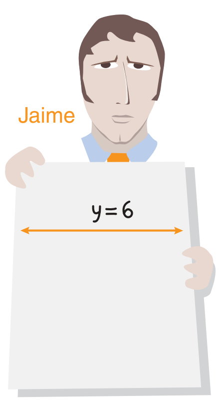
Se trata de enviar un mensaje secreto —concertar una cita en un determinado lugar a una cierta hora— por medio de cinco mensajeros. Es de temer, sin embargo, que uno o dos sean interceptados. Deseamos, en consecuencia, diseminar el mensaje entre los cinco mensajeros de modo tal, que tres cualesquiera de ellos puedan reconstruirlo juntos, pero dos o menos, no.

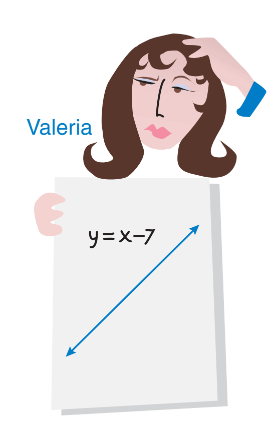
Dado que los mensajes consisten en números en clave, se podría pensar que este problema consiste en hacer que los cinco correos compartan el secreto de un número. Intuitivamente, podríamos considerar prudente dar a cada uno una parte del número, pero eso no sería lo más seguro. Querremos más bien establecer un "salto" de información: que dos correos no nos den información útil, pero tres nos entreguen el mensaje completo. Para lograr tal objetivo será preciso idear un plan más sagaz.

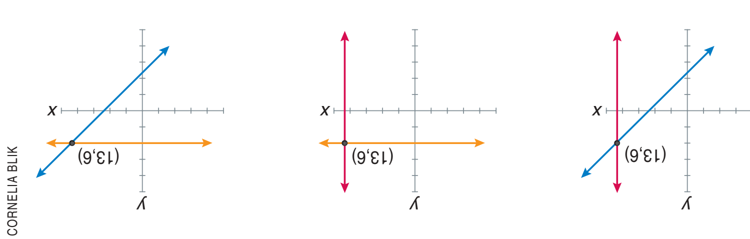
Como ejercicio preliminar, imaginemos que pienso en un punto del plano —el de coordenadas (13, 6), por ejemplo— y le pido a tres amigos que identifiquen ese lugar. Yo deseo que, en cuanto se junten dos cualesquiera de ellos, lo encuentren, pero que no le sea posible a ninguno por separado. Como pista, le doy a Marta la recta $x = 13$, a Jaime la recta $y = 6$ y a Valeria la recta $y = x - 7$ (*véase la ilustración al pie*). ¿Cómo podrían mis compañeros servirse de esa información? ¿Se da cuenta el lector de que es necesario y suficiente que se junten dos? Un razonamiento similar le dará la solución del problema de los cinco correos.

PROBLEMA PRELIMINAR ¿Cómo podrían dos cualesquiera de mis amigos hallar el punto (13, 6) sin que ninguno pueda lograrlo por sí solo, tras asignar a cada uno la recta indicada en el dibujo?









CORNELIA BLIK

SOLUCION: Cada uno, por separado, sólo conoce una recta que pasa por el punto, información insuficiente para determinarlo, pues mi punto podría ser uno cualquiera de los infinitos que la recta contiene. En cambio, dos de ellos pueden hallar instantáneamente el punto (13, 6) determinando el punto de intersección de sus rectas en una hoja cuadriculada. Pasan así de tener una incertidumbre infinita a tener conocimiento exacto.

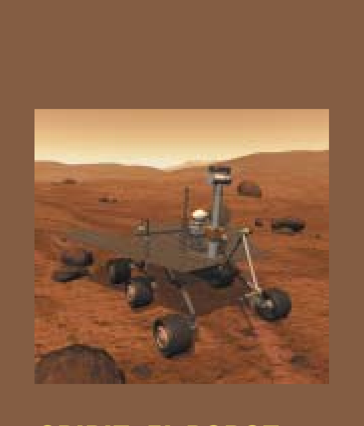
Solución del problema del mes pasado:

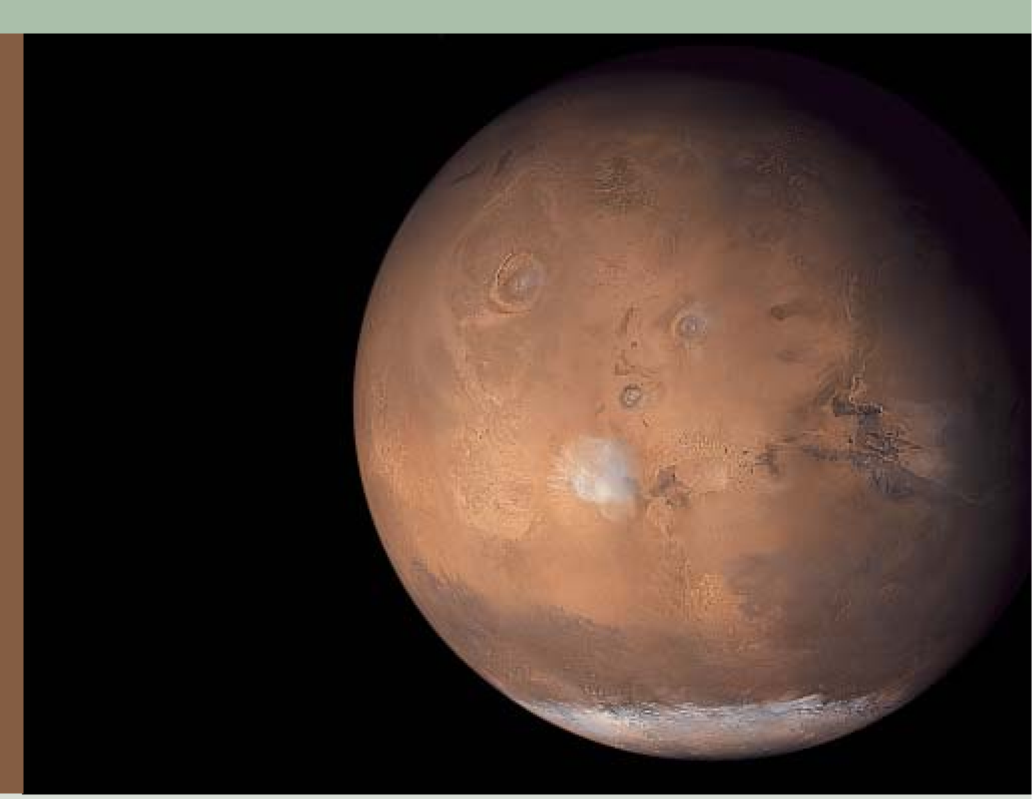
Para verificar los circuitos de cuatro elementos son necesarios dos ensayos. En el primero se pone un 0 en las entradas A, B y C y un 1 en la entrada D; la salida E deberá ser un 1. En el segundo se pone un 1 en las entradas A y C y un 0 en las entradas B y D; la salida E debería ser 0. Si el circuito tuviera cuatro puertas Y serían necesarios tres ensayos, cuyas entradas serían las siguientes: 0111 (lo que significa que la entrada A recibe un 0 y las otras tres, sendos 1), 1011 y 1110.
En configuraciones con tres elementos hay solamente dos circuitos que no puedan verificarse con un solo ensayo: uno donde el elemento 2 es una puerta Y y las demás, puertas 0, y otro donde el elemento 2 es una puerta 0 y las demás, puertas Y.

Solución en la Red

Se puede ver una solución del problema del mes pasado visitando www.investigacionyciencia.es.







SPIRIT, EL ROBOT EXPLORADOR, por George Musser

El vehículo explorador de la NASA lucha contra la maldición del Planeta Rojo.



EL CALENTAMIENTO GLOBAL: UNA BOMBA DE RELOJERIA, por James Hansen

El calentamiento global es una realidad. Se anuncian consecuencias desastrosas. Sin embargo, aún estamos a tiempo de retardar, y con el tiempo detener, el proceso.



LA TIERRA TIEMBLA EN SILENCIO, por Peter Cervelli

No todos los seismos van acompañados de un gran estruendo. En ocasiones, temblores silenciosos presagian tsunamis o terremotos devastadores.



EL CEREBRO ADICTO, por Eric J. Nestler y Robert C. Malenka

El abuso de drogas produce cambios duraderos en el cerebro. El conocimiento de las bases moleculares de dichas adaptaciones ofrece nuevos enfoques para tratar el comportamiento compulsivo que acompaña a la adicción.



EL ENIGMA DEL CALENDARIO MAYA, por Andreas Fuls

No sabemos todavía cómo el calendario maya se incorporó a nuestra forma de computar el tiempo. La solución del enigma se encuentra posiblemente en el Códice de Dresde y otros apuntes de astronomía de este pueblo centroamericano.